

EDISI

II

Pengantar Material Teknik

Bondan Tiara Sofyan

403



PENERBIT
UNHAN RI PRESS

ISBN 978-623-6610-93-0



Pengantar Material Teknik

Edisi Kedua

Bondan Tiara Sofyan



Penerbit:
UNHAN RI PRESS

Pengantar Material Teknik

Edisi 2

Bondan Tiara Sofyan
@bondantiara
Hak Cipta © 2021

Designer dan Editor: Rudy Saputra, @rudysaputra11
Cover Design : Irene Angela, @ireneeangela
Tata Letak : Rudy Saputra



Penerbit: UNHAN RI PRESS
Kawasan IPSC Sentul Bogor,
Jawa Barat 16810
Telp. : (021) 879 51555
Fax : (021) 87953757
Website: <http://www.idu.ac.id>

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik secara elektronis maupun mekanis, termasuk tidak terbatas pada memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

UNDANG-UNDANG NOMOR 28 TAHUN 2014 TENTANG HAK CIPTA

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta yang meliputi penerjemahan dan pengadaptasian Ciptaan 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)**.
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta yang meliputi penerbitan, penggandaan dalam segala bentuknya, dan pendistribusian Ciptaan untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama **4 (empat) tahun** dan/atau pidana denda paling banyak **Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah)**.
3. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada poin kedua di atas yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama **10 (sepuluh) tahun** dan/atau pidana denda paling banyak **Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah)**.

ISBN 978-623-6610-93-0



Sofyan, Bondan Tiara

Pengantar Material Teknik Edisi kedua/Bondan Tiara Sofyan

—Bogor: UNHAN RI PRESS, 2021

1 jil., 239 hlm., 19 × 26 cm

Kupersembahkan untuk yang kucintai

*Mami Alm Wiesmar Zainoeddin dan Papi Alm R. Soedaryoko Tjokrosoegijo, suamiku
M. Sofyan Syahril, serta anak-anakku Shabila Anjani, Sasongko Wahyu Kumoro,
Nabila Astari, Rudy Saputra, Admiral Yasser Sofyan, dan cucuku Sakhiy Arjen Kumoro*

SAMBUTAN REKTOR

UNIVERSITAS PERTAHANAN REPUBLIK INDONESIA

Dengan memanjatkan puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa, saya menyambut baik terbitnya buku Pengantar Material Teknik edisi kedua, yang ditulis oleh salah satu dosen Fakultas Teknologi Pertahanan Universitas Pertahanan Republik Indonesia (UNHAN RI), yaitu Prof. Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Si. Buku Pengantar Material Teknik edisi pertama telah dipakai sebagai buku ajar di berbagai universitas di Indonesia dan telah dicetak ulang sebanyak tiga kali. Penerbitan edisi kedua buku ini oleh UNHAN RI PRESS, digunakan sebagai buku ajar untuk mata kuliah Ilmu Rekayasa Material/Dasar Ilmu Material/Bahan Bangunan di Program S1 Fakultas Teknik Militer dan Fakultas MIPA Militer UNHAN RI, maupun sebagai buku referensi di empat program studi magister Fakultas Teknologi Pertahanan UNHAN RI.

Penguasaan teknologi merupakan salah satu indikator majunya sebuah negara. Dengan menguasai teknologi, maka industri barang dan jasa di berbagai bidang akan bergerak menjadi lebih efisien dan produktif. Bidang pertahanan menjadi salah satu pionir dalam pengembangan teknologi. Berbagai teknologi maju, diawali dari kebutuhan bidang pertahanan. Perspektif inilah yang merupakan salah satu dasar yang mendorong UNHAN RI mendirikan Fakultas Teknologi Pertahanan di tingkat magister dan Fakultas Teknik Militer di tingkat sarjana. Semua teknologi membutuhkan material, dan material dapat direkayasa sesuai kebutuhan kinerja yang dipersyaratkan. Oleh karenanya penguasaan teknologi material menjadi penting dalam pengembangan teknologi. Buku Pengantar Material Teknik ini menjadi salah satu dasar penting untuk mulai mempelajari material bagi Kadet Mahasiswa program sarjana S1, khususnya di Fakultas Teknik Militer dan Fakultas MIPA Militer. Bagi mahasiswa program magister Fakultas Teknologi Pertahanan yang akan melakukan berbagai rekayasa dan simulasi, buku ini sangat baik untuk menyegarkan kembali pemahaman tentang dasar-dasar, sifat, aplikasi serta pemrosesan material.

Dengan diterbitkannya buku Pengantar Material Teknik edisi kedua dalam versi elektronik yang didistribusikan secara bebas tidak berbayar, saya berharap akan menjangkau lebih banyak lagi pembaca dan bermanfaat untuk banyak institusi. Hal ini merupakan salah satu wujud nyata kontribusi UNHAN RI bagi dunia pendidikan di tanah air, sebagai bagian dari upaya mencapai salah satu tujuan nasional yang telah dituliskan oleh para pendiri bangsa, yaitu "Mencerdaskan kehidupan bangsa". Dan tentunya, tujuan ini secara langsung menjadi wujud Bela Negara.

Selaku Rektor, saya senantiasa mendorong seluruh mahasiswa, alumni dan dosen UNHAN RI untuk terus berkarya dan berkontribusi bagi Indonesia. Sekali lagi saya ucapkan selamat atas terbitnya buku Pengantar Material Teknik edisi kedua ini dan semoga semakin banyak karya-karya berupa buku maupun jurnal ilmiah yang lahir dari hasil proses belajar mengajar di UNHAN RI.

Salam Bela Negara!

Bogor, September 2021

Rektor

Universitas Pertahanan Republik Indonesia,

**Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, S.T., M.Sc., DESD.
Laksamana Madya TNI**



TENTANG PENULIS

Prof. Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Si.

Bondan Tiara Sofyan dilahirkan di Duri, Riau, 21 April 1969. Ia menamatkan S1 di bidang Teknik Metalurgi di Universitas Indonesia pada tahun 1991, S2 di bidang Ilmu Material di Universitas Indonesia pada tahun 1995 dan S3 di bidang Teknik Material di Monash University, Australia pada tahun 2003. Ia dikukuhkan menjadi Guru Besar Tetap Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia (FTUI) pada tahun 2010. Selanjutnya ia menyelesaikan Program Pendidikan Singkat Angkatan (PPSA) XIX LEMHANNAS RI tahun 2013.

Penelitian Prof. Bondan fokus pada pengembangan material berkekuatan dan berkinerja tinggi, khususnya pada material logam non-fero, antara lain adalah pengembangan komposit aluminium sebagai material balistik yang telah berhasil menahan penetrasi peluru kaliber 7,62 mm, serta pengembangan paduan ingat bentuk (*Shape Memory Alloy*) berbasis Cu-Zn-Al.

Prof. Bondan telah menulis buku Pengantar Material Teknik Edisi 1 yang menjadi buku ajar di banyak perguruan tinggi. Selain itu, ia telah menulis lebih dari 100 artikel ilmiah. Ia juga beberapa kali memperoleh penghargaan sebagai peneliti terbaik dan peneliti produktif, baik di tingkat Universitas Indonesia maupun di tingkat Ditjen Dikti. Ia menjadi bagian dari 100 Peneliti Wanita yang dipilih oleh Kementerian Pemberdayaan Perempuan RI. Pada tahun 2008-2014 ia dipercaya menjadi Manajer Pendidikan dan Riset di FTUI. Berbagai program ia luncurkan untuk meningkatkan kinerja, atmosfer dan kualitas riset FTUI.

Di bidang pengajaran, Prof. Bondan juga telah memperoleh berbagai penghargaan. Secara konsisten, ia selalu menjadi dosen dengan nilai EDOM (Evaluasi Dosen oleh Mahasiswa) tertinggi di Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI. Ia juga memperoleh *Teaching Excellence Award* dari FTUI tahun 2014 untuk kinerja pengajaran dan pembimbingan akademik.

Pada tahun 2013, Prof. Bondan diangkat menjadi Tenaga Ahli Pengkaji Bidang Ilmu Pengetahuan dan Teknologi di LEMHANNAS RI. Dalam kapasitas ini, ia memimpin berbagai kajian sebagai masukan bagi Presiden RI. Selanjutnya pada tahun 2016, ia menjadi Staf Ahli Menteri Pertahanan bidang Ekonomi. Sebagai Staf Ahli, ia menulis dan memberi masukan kepada Menhan. Secara khusus, ia membantu Menhan memetakan kinerja Kemhan dikaitkan dengan Nawa Cita. Pemetaan ini memberikan gambaran bagi seluruh satuan kerja Kemhan untuk menyatukan dan mempercepat langkah sesuai Visi dan Misi Pemerintah. Ia kemudian terpilih menjadi Top 9 Pejabat Pimpinan Tinggi Madya Teladan Tingkat Nasional oleh KempAN-RB di tahun 2017. Selanjutnya pada April 2018, ia dipercaya menjadi Direktur Jenderal Potensi Pertahanan, Kemhan RI, yang membina dan mengelola seluruh potensi pertahanan nir-militer, mencakup: Komponen Cadangan, Komponen Pendukung, Veteran, Bela Negara dan Industri Pertahanan. Dengan latar belakang bidang teknik yang kuat, ia mendorong percepatan pertumbuhan industri pertahanan sehingga menjadi mandiri dan dapat diandalkan, serta menggerakkan seluruh program dengan efektif, efisien dan akuntabel. Pada tahun 2020, Prof. Bondan diangkat sebagai Dosen Tetap di Fakultas Teknologi Pertahanan Universitas Pertahanan Republik Indonesia. Selanjutnya, pada tahun 2021, Prof. Bondan juga aktif kembali di LEMHANNAS RI sebagai Tenaga Ahli Pengkaji Bidang Sosial Budaya.

KATA PENGANTAR EDISI KE-2

Sebelas tahun telah berlalu sejak buku Pengantar Material Teknik Edisi ke-1 terbit. Setelah cetak ulang sebanyak 3 kali, sudah saatnya meluncurkan buku Edisi ke-2 dengan isi yang lebih kaya. Struktur buku tidak mengalami perubahan, yaitu dimulai dengan bahasan mengenai ilmu material umum, yang mencakup atom, molekul dan ikatan antar atom. Kemudian, dibahas mengenai sifat material, baik sifat mekanik, fisik maupun kimia, dengan tujuan agar mahasiswa mengetahui bagaimana respons material terhadap sebuah pembebanan mekanik, fisik atau aktivitas kimiawi dan bagaimana cara mengukurnya secara kuantitatif. Setelah pemahaman dasar tersebut, kemudian dibahas berbagai macam material, meliputi logam (fero dan non fero), polimer, keramik dan komposit.

Pada buku edisi ke-2 ini, isi Bab 3 mengenai Sifat Material diperbanyak, dengan pemikiran bahwa penguasaan mengenai sifat material, khususnya sifat mekanik, sangat diperlukan oleh mahasiswa, untuk memahami bagaimana respons suatu material bila dipakai dalam aplikasi tertentu dengan pembebanan tertentu. Materi tentang sifat fisik dan sifat kimia material juga diperkaya, sehingga diharapkan mahasiswa memiliki pemahaman lebih baik terhadap kinerja material lainnya seperti magnetisme, listrik, optik, dan lain-lain. Selain itu, ada tambahan 2 bab baru, yaitu Bab 6 tentang Pembentukan dan Perlakuan Panas Logam serta Bab 11 tentang Kumpulan Soal Komprehensif. Bab 6 dimaksudkan untuk memberikan pemahaman dasar mengenai berbagai teknik pembentukan dan perlakuan panas pada logam, sehingga bila mahasiswa melihat sebuah produk dari logam, mereka diharapkan dapat menjelaskan bagaimana teknik manufaktur produk tersebut, mulai dari bahan setengah jadi hingga produk jadi. Sementara Bab 11 menjadi sumber ide bagi para pengajar, untuk membuat soal-soal yang membutuhkan pemikiran orde tinggi, untuk mencapai tingkat kognisi mahasiswa yang lebih tinggi.

Untuk buku edisi ke-2 ini, penulis menghaturkan terima kasih khususnya kepada Sdr. Rachman Kurnia, mahasiswa bimbingan penulis yang saat ini sedang mengambil S2 di Korea, yang telah membantu mengecek ulang perbaikan-perbaikan yang diperlukan pada buku edisi pertama. Terima kasih kepada Sdri. Irene Angela, mahasiswa bimbingan penulis yang sedang S2 di Glasgow, UK, untuk design cover buku yang keren ini. Terima kasih untuk ananda Nabila Astari dan Rudy Saputra yang telah membantu redesain buku, sehingga lebih mudah dan menarik untuk dibaca. Terima kasih juga penulis haturkan kepada Universitas Pertahanan Republik Indonesia, yang telah menjadi rumah baru penulis dan terus memberi dorongan berkarya untuk bangsa.

Kritik dan saran untuk perbaikan dan peningkatan kualitas buku, sangat penulis harapkan, dan dapat disampaikan melalui email di bawah. Akhir kata, semoga buku ini bermanfaat bagi para mahasiswa, segenap pembaca dan dunia pendidikan Indonesia.

Depok, September 2021

Bondan Tiara Sofyan
bondan@eng.ui.ac.id
bondan.tiara@idu.ac.id
@bondantiara

KATA PENGANTAR EDISI KE-1

Buku Pengantar Material Teknik ini merupakan obsesi penulis yang sudah lama, untuk membuat sebuah buku pegangan bagi mahasiswa Fakultas Teknik dan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, dan Politeknik pada umumnya. Hal ini didorong oleh tidak banyaknya buku sejenis yang tersedia di Indonesia. Buku ini dapat dipakai sebagai pengantar terhadap Material Teknik dan ditujukan bagi mahasiswa Teknik seluruh jurusan, khususnya mahasiswa tahun pertama. Buku ini disusun dengan sumber acuan utama, yaitu: *Materials Science And Engineering, An Introduction* karya William D Callister, Jr. , penerbit John Wiley & Sons, Inc. yang merupakan buku yang sangat baik di bidang material teknik. Buku Pengantar Material Teknik ini juga didukung oleh pengalaman mengajar penulis selama kurang lebih 15 tahun dan rangkaian penelitian di bidang material. Sehingga diharapkan buku ini dapat membantu mahasiswa dalam mengkonstruksi pengetahuan mereka mengenai berbagai jenis material, karakteristik dan aplikasinya.

Buku ini dimulai dengan bahasan mengenai ilmu material umum, yang mencakup atom, molekul dan ikatan antar atom. Setelah itu, kemudian dibahas mengenai sifat mekanis material, guna memberi pengetahuan kepada mahasiswa bagaimana karakteristik suatu material ditentukan. Setelah pemahaman dasar tersebut, kemudian dibahas berbagai macam material, meliputi logam (fero dan non fero), polimer (plastik), keramik dan komposit. Di setiap awal bab diberikan tujuan instruksional yang diharapkan dari bahasan yang bersangkutan, sementara untuk membantu pemahaman mahasiswa, di setiap akhir bab diberikan soal-soal.

Penulis menghaturkan terima kasih kepada Sdr. Lulus Basuki dan Sdri. Irlinda Desita, mahasiswa bimbingan penulis, yang telah membantu dalam mengedit buku ini serta membuatkan sebagian ilustrasi dan gambar. Terima kasih untuk ananda Shabila Anjani yang telah melakukan sentuhan akhir pada buku ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Fakultas Teknik Universitas Indonesia, khususnya Departemen Teknik Metalurgi dan Material, dimana penulis berkiprah sebagai tenaga akademik, yang telah memberi keleluasaan dan dorongan untuk terus berkarya. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih dan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada seluruh mahasiswa bimbingan penulis, yang telah melakukan penelitian dengan baik dan dapat memperkaya khasanah ilmu di Indonesia. Sebagian isi buku ini merupakan hasil penelitian dari mahasiswa-mahasiswa tersebut.

Demikianlah, semoga buku ini dapat memberi setitik sumbangan bagi dunia pendidikan di Indonesia. Segala kritik dan saran sangat diharapkan guna peningkatan kualitas buku ini di masa depan.

Depok, April 2010

Bondan T. Sofyan
Email: bondan@eng.ui.ac.id

DAFTAR ISI

Sambutan Rektor UNHAN RI	v
Tentang Penulis	vii
Kata Pengantar Edisi 2	ix
Kata Pengantar Edisi 1	xi
Bab 1 Material	1
1.1. Apa itu Material?	1
1.2. Apa itu Teknik Material?	1
1.3. Klasifikasi Material	4
1.4. Material Masa Depan	6
1.5. Material Militer	6
Latihan	8
Bab 2 Struktur Atom dan Ikatan Antar-atom	9
2.1. Pendahuluan	9
2.2. Struktur Atom	9
2.3. Tabel Periodik	14
2.4. Ikatan Atom pada Padatan	16
2.5. Material Kristalin dan Nonkristalin	20
Latihan	23
Bab 3 Sifat Material	25
3.1. Pendahuluan	25
3.2. Sifat Mekanik Material	26
3.3. Konsep Tegangan dan Regangan	27
3.4. Pengujian Tarik	30
3.5. Pengujian Kekerasan	36
3.6. Pengujian Impak	39
3.7. Sifat Fisik Material	40
3.8. Sifat Kimia Material	47
Latihan	50
Bab 4 Sifat, Aplikasi, dan Pemrosesan Logam Fero	55
4.1. Pendahuluan	55
4.2. Proses Pembuatan Besi dan Baja	56
4.3. Baja	62
4.4. Besi Tuang	71
Latihan	74

Bab 5	Sifat, Aplikasi, dan Pemrosesan Logam Non-Fero	77
	5.1. Aluminium	77
	5.2. Tembaga	84
	5.3. Magnesium	87
	5.4. Titanium	91
	5.5. Logam Refraktori	93
	5.6. Paduan Super	97
	5.7. Logam Mulia	101
	Latihan	106
Bab 6	Pembentukan dan Perlakuan Panas Logam	107
	6.1. Pendahuluan	107
	6.2. Pengecoran	108
	6.3. Pembentukan Padat	115
	6.4. Metalurgi Serbuk	124
	6.5. Perlakuan Panas	125
	6.6. Pengelasan	132
	Latihan	143
Bab 7	Mekanisme Penguatan Pada logam	145
	7.1. Pendahuluan	145
	7.2. Pengerasan Regang	145
	7.3. Penguatan Batas Butir	152
	7.4. Penguatan Larutan Padat	154
	7.5. Penguatan Pengendapan	155
	Latihan	165
Bab 8	Sifat, Aplikasi, dan Pemrosesan Polimer	167
	8.1. Pendahuluan	167
	8.2. Molekul Polimer	168
	8.3. Struktur molekul	172
	8.4. Polimer Termoplastik, Termoset, dan Elastomer	173
	8.5. Polimer Kristalin	174
	8.6. Prilaku Tegangan-Regangan Polimer	175
	8.7. Proses Pembuatan Polimer	176
	8.8. Proses Pembentukan Polimer	178
	Latihan	188
Bab 9	Sifat, Aplikasi, dan Pemrosesan Keramik	189
	9.1. Pendahuluan	189
	9.2. Klasifikasi Keramik	189
	9.3. Struktur Kristal Keramik	191
	9.4. Keramik Silikat	194
	9.5. Karbon	198
	9.6. Sifat Mekanik Keramik	202
	9.7. Sifat Kelistrikan Keramik	205
	9.8. Sifat Kemagnetan Keramik	207
	9.9. Fabrikasi dan Pemrosesan Keramik	207
	Latihan	215

Bab 10	Sifat, Aplikasi, dan Pemrosesan Komposit	217
	10.1. Pendahuluan	217
	10.2. Komposit Bermatriks Polimer	219
	10.3. Komposit Bermatriks Logam	222
	10.4. Komposit Bermatriks Keramik	224
	10.5. Komposit Struktural	226
	Latihan	227
Bab11	Kumpulan Soal Komprehensif	229
	Pertanyaan 1	229
	Pertanyaan 2	230
	Pertanyaan 3	230
	Pertanyaan 4	231
	Pertanyaan 5	231
	Pertanyaan 6	232
	Pertanyaan 7	232
	Pertanyaan 8	233
	Pertanyaan 9	233
	Pertanyaan 10	234
	Pertanyaan 11	234
	Pertanyaan 12	235
	Pertanyaan 13	236
	Pertanyaan 14	236
	Pertanyaan 15	237
	Pertanyaan 16	238
	Pertanyaan 17	239
	Pertanyaan 18	239
Daftar Pustaka		D-1
Indeks		I-1

BAB 1

MATERIAL

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

1. Memahami jenis-jenis material dan beberapa sifatnya.
2. Memahami apa yang dimaksud dengan struktur dan sifat material.
3. Memahami aplikasi material dalam kehidupan sehari-hari.

1.1 Apa itu Material?

Material selalu menjadi tonggak dari sejarah peradaban manusia, di mana kita mengenal adanya Zaman Batu, Zaman Perunggu, dan Zaman Besi. Saat ini, material pun memainkan peranan yang sangat penting dalam perkembangan teknologi. Dalam bidang apa pun, seorang insinyur (*engineer*) tidak dapat membuat barang baru tanpa memperhitungkan sifat material yang akan digunakan. Pada umumnya, kemampuan mesin atau suatu struktur akan bergantung pada sifat material yang menyusunnya. Material pada dasarnya adalah sesuatu yang ada di mana saja, kapan saja, dan dalam keadaan apa saja.

1.2 Apa itu Teknik Material?

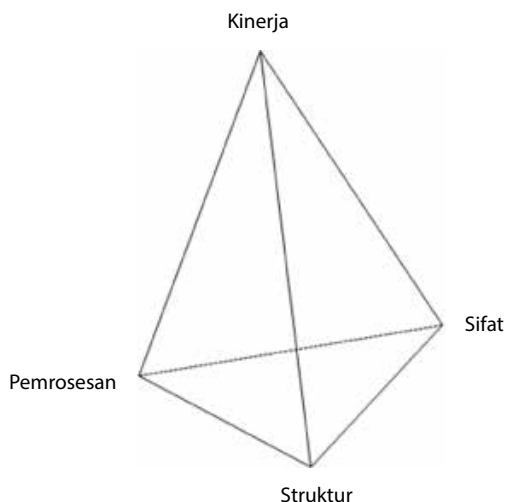
Pada dasarnya, disiplin ilmu “Teknik Material” mempelajari hubungan antara **struktur**, **sifat**, **pemrosesan**, dan **kinerja material**, serta mengeksplorasi hubungan tersebut sehingga dapat menghasilkan suatu produk yang memiliki sifat yang sesuai dengan desain. Dengan mempelajari hal tersebut, kita dapat memilih dan mendesain material yang paling tepat untuk setiap aplikasi, serta dapat menentukan teknik pemrosesan yang paling tepat.

Secara singkat, “struktur” dari sebuah material umumnya berhubungan dengan susunan dari komponen-komponen dalam suatu material. Struktur suatu material dalam skala atom terdiri atas atom, elektron, atau molekul. Struktur ini sering disebut sebagai struktur nano (*nano structures*). Struktur nano mengalami perkembangan yang sangat pesat pada dekade terakhir ini, yang mana dipercaya akan menjadi pemegang kunci perkembangan teknologi pada abad ke-21. Dalam skala yang lebih besar, struktur material terdiri atas gabungan kelompok - kelompok atom, umumnya disebut sebagai struktur mikroskopik (*microscopic structures*), yang berarti dapat dilihat dengan bantuan mikroskop. Terakhir, struktur mikroskopik akan bergabung menjadi sesuatu yang dapat dilihat oleh mata telanjang, yang disebut sebagai struktur makroskopik (*macroscopic structures*).

Terminologi “sifat” akan dijelaskan sebagai berikut. Dalam pemakaiannya, semua material akan terekspos pada faktor eksternal yang menyebabkan material memberikan respons. Sebagai contoh, sebatang kawat tembaga akan bengkok ketika kita memberikan beban, rambu-rambu lalu lintas akan bercahaya ketika terkena sinar lampu mobil, atau sebuah gelas kaca akan pecah ketika terjatuh. Respons material terhadap stimulus yang diberikan itu disebut sebagai “sifat” material. Jadi, kawat tembaga disebut bersifat plastis; stiker atau cat huruf pada rambu lalu lintas disebut bersifat fosforesensi; dan gelas kaca disebut bersifat getas. Sifat material umumnya dinyatakan dalam suatu satuan yang tidak bergantung pada bentuk dan ukuran.

Hubungan antara struktur, sifat, pemrosesan, dan kinerja ini dapat dilihat pada Gambar 1.1. Dari gambar ini, kita dapat melihat bahwa keempat komponen saling memengaruhi, di mana struktur dari suatu material bergantung dari cara pemrosesannya dan akan menentukan sifat material. Kemudian, kinerja suatu material merupakan fungsi dari sifat material itu sendiri. Secara mendasar, bagaimana keempat hal tersebut saling berhubungan atau memengaruhi, akan diperkenalkan dalam buku ini.

Salah satu contoh konsep hubungan antara pemrosesan-struktur-sifat-kinerja dapat dilihat pada Gambar 1.2, yang menggambarkan tiga bentuk dari karbon. Bentuk karbon di sebelah kiri adalah karbon dalam bentuk grafit yang berwarna hitam dan tidak tembus pandang, yang menjadi bahan baku pensil. Bentuk karbon di bagian tengah adalah karbon dalam bentuk intan yang dipakai sebagai perhiasan yang tidak berwarna dan transparan. Sementara, bentuk karbon di sebelah kanan adalah larutan karbon “buckminsterfullerene” yang cair dan berwarna merah. Perbedaan ketiga jenis karbon disebabkan oleh perbedaan yang ada pada struktur karbon. Grafit berstruktur heksagonal berlapis dan padat sehingga berwarna hitam dan relatif lunak karena ikatan

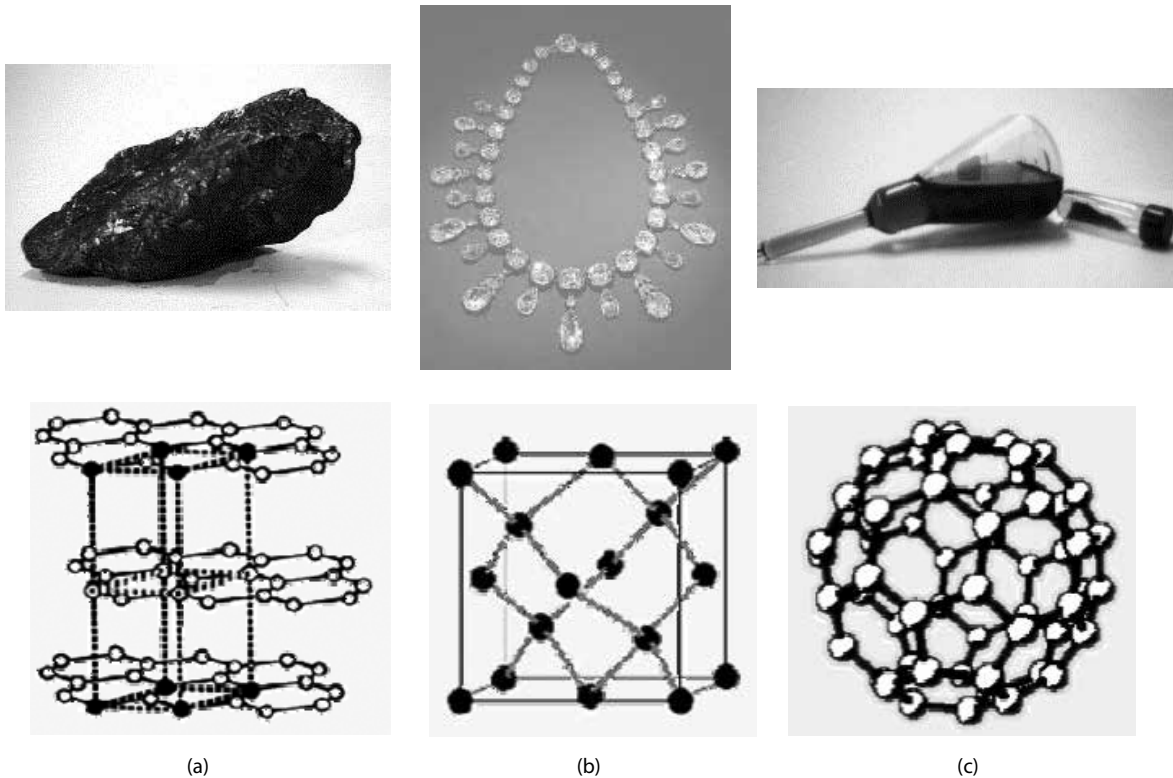


GAMBAR 1.1 Hubungan antara pemrosesan, struktur, sifat, dan kinerja material.

antar lapisannya merupakan ikatan sekunder yang tidak kuat. Intan berstruktur kubik intan dengan ikatan kovalen yang terarah sehingga menjadi transparan dan sangat keras. Terakhir, larutan buckminsterfullerene berstruktur bentuk bola yang merupakan partikel nano yang dapat larut.

Jadi, ketiga jenis karbon berbeda dalam hal struktur kristal dan ikatan antar-atomnya, di mana menyebabkan perbedaan sifat fisik (warna) dan sifat mekanik (kekerasan). Ketiga jenis karbon tentunya dapat memiliki perbedaan struktur karena diproses secara berbeda. Oleh karena sifat fisik dan mekanik yang berbeda, maka kinerja dari ketiga material ini berbeda.

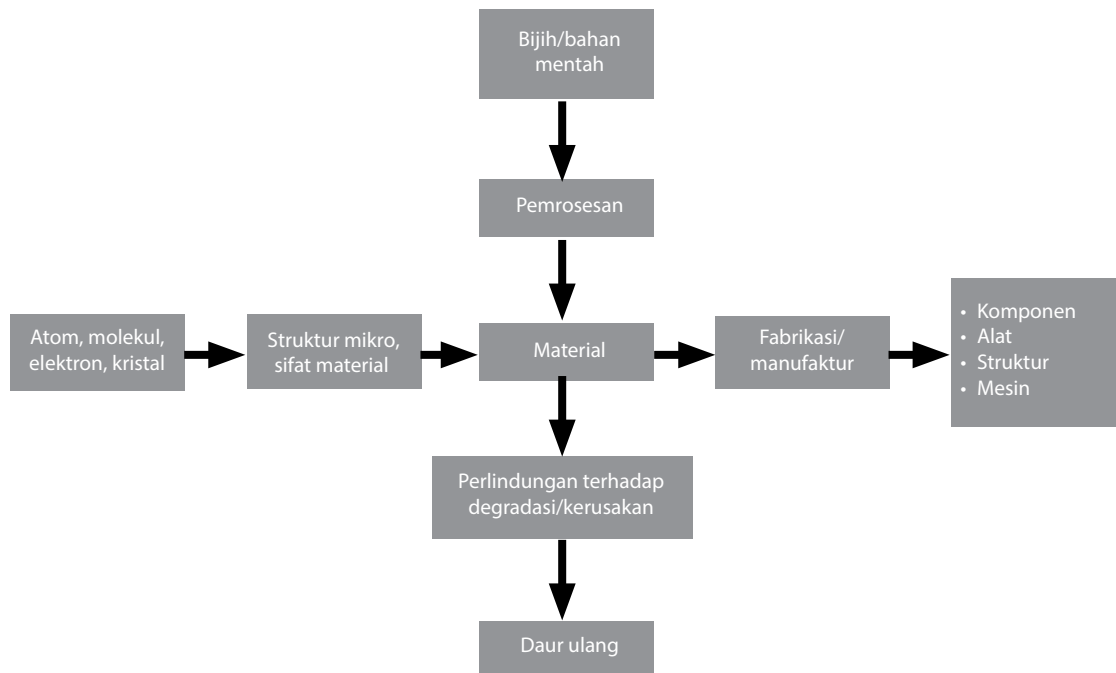
Secara umum, hubungan alur pemrosesan sebuah material, yang dimulai dari penambangan atau bahan mentah hingga material tersebut dipakai dan mengalami



GAMBAR 1.2 Berbagai bentuk karbon yang berbeda karena perbedaan struktur; (a) grafit yang hitam dan tidak tembus pandang karena strukturnya heksagonal berlapis; (b) intan yang tidak berwarna dan transparan karena strukturnya kubik intan yang berikatan kovalen dan terarah; (c) larutan buckminsterfullerene yang berwarna merah karena struktur bola dalam bentuk partikel nano.

kerusakan, serta sifatnya dapat dilihat pada Gambar 1.3. Jadi, apabila keseluruhan aspek digabungkan, maka akan diperoleh gambaran utuh tentang bagaimana pengetahuan material teknik digunakan untuk berbagai cabang teknik dan aplikasi sesuai desain dan kinerja yang diinginkan.

Ruang lingkup pada Gambar 1.3 sering dibagi menjadi dua bagian, yaitu teknik metalurgi dan teknik material. Mengapa? Teknik metalurgi pada dasarnya mempelajari bagaimana memproses bijih logam sehingga menjadi bahan (olahan) setengah jadi. Jadi, teknik ini meliputi (1) bagaimana proses penambangan dilakukan, (2) bagaimana proses pengolahan bijih logam, dan kemudian (3) bagaimana mengekstrak logam dari bijihnya sehingga bahan logam setengah jadi dapat diperoleh. Ilustrasi mengenai teknik metalurgi hanya mencakup bagian Gambar 1.3 bagian atas. Ketika bahan logam setengah jadi diproses lebih lanjut maka bidang ini sudah masuk ke area teknik material. Dengan demikian, Anda dapat melihat bahwa—pada bidang ini—Anda akan mempelajari pengolahan logam mulai dari bijih logam hingga logam tersebut dipakai sebagai struktur atau produk, bahkan sampai produk tersebut rusak atau berkarat. Jadi, jika Anda menguasai bidang ini, Anda dapat berkiprah di seluruh cabang ilmu teknik karena semuanya memerlukan material.



GAMBAR 1.3 Ruang lingkup pengetahuan material teknik.

1.3 Klasifikasi Material

Secara konvensional, material padat dibedakan menjadi tiga kelompok, yaitu logam, polimer, dan keramik. Pengelompokan atau pengategorian ini terutama didasarkan pada susunan atom dan kimiawi. Selain ketiga jenis material tersebut, terdapat juga jenis material, seperti komposit, semikonduktor, dan biomaterial. Setiap material tersebut akan dijelaskan pada pembahasan berikutnya.

Logam

Material logam tersusun dari atom-atom logam yang merupakan unsur terbanyak di dalam tabel periodik. Atom-atom logam saling berikatan dalam bentuk ikatan logam, di mana elektron valensinya bebas bergerak sehingga material ini memiliki konduktivitas listrik dan termal yang baik, serta tidak tembus cahaya. Logam memiliki kekuatan yang cukup tinggi, namun cukup ulet (dapat dideformasi/diubah bentuk). Contoh logam adalah besi, baja, aluminium, tembaga, emas, perak, dan lain-lain.

Polimer

Material yang termasuk polimer adalah plastik dan karet. Umumnya, polimer merupakan senyawa organik dengan unsur dasar berupa karbon, oksigen, dan hidrogen. Unsur-unsur tersebut tersusun dalam bentuk rantai sehingga memiliki ukuran molekul

yang besar. Atom-atom dalam suatu rantai polimer saling berikatan secara kovalen, sedangkan ikatan antarrantai adalah ikatan van der Waals. Polimer umumnya ringan (memiliki massa jenis yang rendah) dan sangat fleksibel (mudah diubah bentuk).

Keramik

Keramik merupakan senyawa antara unsur logam dan nonlogam, yang memiliki ikatan kovalen atau ionik. Umumnya, senyawa material keramik berada dalam bentuk senyawa oksida (Al_2O_3 , ZnO_2 , MgO , dan lain-lain), nitrida (AlN , TiN , dan lain-lain), karbida (SiC , WC , dan lain-lain), dan senyawa lainnya. Beberapa material yang termasuk dalam klasifikasi keramik adalah gelas atau kaca, semen, dan keramik yang terbuat dari lempung. Material keramik umumnya isolator panas dan listrik, tahan terhadap temperatur tinggi, serta keras, namun getas.

Komposit

Material komposit merupakan gabungan lebih dari satu macam material. Contoh yang paling umum adalah *fiberglass*, yang terdiri atas serat gelas (keramik) sebagai penguat di dalam material polimer. Komposit didesain untuk memperoleh efek sinergis dari sifat-sifat material penyusunnya. Pada *fiberglass*, misalnya, material didesain agar memiliki kekuatan yang cukup tinggi (kontribusi dari material gelas), tetapi memiliki fleksibilitas yang cukup baik (kontribusi dari material polimer).

Semikonduktor

Semikonduktor memiliki sifat penghantar listrik antara konduktor dan isolator. Selain itu, sifat penghantar listriknya sangat sensitif terhadap kehadiran atom pengotor, walau hadir dalam jumlah kecil sekali pun. Kehadiran atom pengotor ini harus dikontrol dalam daerah yang sangat kecil. Material semikonduktor memberikan terobosan yang besar pada sirkuit terintegrasi (*integrated circuit*—IC), yang menghadirkan perubahan revolusioner pada berbagai perangkat elektronik dan komputer pada dua dekade terakhir ini. Sebagai contoh, ukuran telepon selular kini semakin ramping dengan kapabilitas yang semakin canggih.

Biomaterial

Biomaterial mencakup material yang dicangkokkan atau ditanamkan (*implant*) ke dalam tubuh manusia sebagai pengganti bagian tubuh yang rusak atau sakit. Material ini tidak boleh menghasilkan unsur yang beracun ketika bereaksi dengan cairan tubuh dan harus kompatibel dengan jaringan tubuh. Dengan kata lain, reaksi biologis yang buruk tidak boleh terjadi pada penggunaan biomaterial. Semua material sebelumnya—logam, polimer, keramik, komposit, atau semikonduktor—dapat dipakai sebagai biomaterial. Baja tahan karat yang dilapis dengan titanium merupakan salah contoh biomaterial yang dimanfaatkan sebagai bahan tulang pinggul buatan.

1.4 Material Masa Depan

Material Cerdas

Material cerdas (*smart materials*) adalah sekelompok material yang baru dikembangkan. Material ini mampu “merasakan” perubahan lingkungan dan mampu merespons terhadap perubahan tersebut, di mana respons ini mirip dengan respons yang dimiliki oleh makhluk hidup. Material yang termasuk material cerdas adalah material sensor (material yang dapat mendeteksi sinyal input), *shape memory alloys*, keramik piezoelektrik, dan *magnetostrictive*. *Shape memory alloys* adalah suatu jenis logam, di mana bentuknya dapat kembali pada bentuk semula jika temperatur diubah/kembali ke temperatur awal, yaitu temperatur pembentukan logam pada mulanya. Keramik piezoelektrik akan memuai bila ada beban dan pemuaian ini menghasilkan medan listrik, sehingga dapat dipakai sebagai sensor beban pada lift atau mesin uji tarik. Material *magnetostrictive* mirip dengan (material) piezoelektrik, namun responsif terhadap medan magnet.

Nanoteknologi

Saat ini, perkembangan teknologi material menunjukkan bahwa material dapat didesain satu per satu dari atom atau molekul untuk membentuk struktur material baru. Penyusunan material atom demi atom ini memungkinkan ilmuwan/peneliti material mendesain material sesuai kebutuhan. Selain itu, secara konvensional, material dapat dibelah dan dihancurkan sehingga berukuran sangat kecil, di mana sifat yang dihasilkan jauh berbeda dengan sifat material dalam skala penyusunan dan pembelahan material dalam skala atom, yang berukuran rata-rata 0,2 nm. Teknologi ini dikenal sebagai nanoteknologi, yang mulai berkembang sangat pesat pada dekade terakhir ini. Nano merupakan ukuran dalam skala 10^{-9} m. Jadi, secara umum, material dengan ukuran di bawah 100 nm dianggap sebagai material berstruktur nano. Salah satu contoh material ini adalah partikel yang dimasukkan ke dalam lapisan filter kaca kendaraan bermotor, di mana partikel ini berukuran nano sehingga tidak mengurangi sifat tembus pandang kaca, tetapi memiliki kemampuan untuk menyerap sinar ultraviolet. Logam berukuran butir nano memiliki kekuatan yang sangat superior dengan tingkat keuletan yang terjaga. Di masa depan, sudah tidak disangsikan lagi, perkembangan teknologi akan memanfaatkan material yang direkayasa dalam skala nano.

1.5 Material Militer

Peralatan militer, baik pada matra darat, laut, udara maupun peralatan komunikasi dan informasi serta kebutuhan personel militer, pada umumnya memiliki spesifikasi khusus agar dapat menjalankan misinya. Spesifikasi khusus tersebut sering disebut **Military Specification** atau **MIL-SPEC**. Spesifikasi khusus yang lebih rinci, mencakup desain, proses fabrikasi serta persyaratan lainnya disebut **Military Detailed Specification**, disingkat **MIL-DTL**. Oleh karena itu, material penyusunnya pun harus memiliki karakteristik khusus. Standar yang digunakan pada peralatan militer, material penyusunnya maupun pengujiannya disebut Standar Militer (**Military Standard**, atau sering disingkat **MIL-STD**). Sebagai contoh, MIL-STD-810 adalah standar pengujian

ketangguhan komputer untuk dipakai pada kondisi lingkungan yang ekstrim. Cakupan standar ini adalah untuk menguji apakah sebuah komputer dapat dioperasikan aman setelah kondisi diantaranya: setelah dijatuhkan beberapa kali dari ketinggian 1,3 m, dikejutkan dengan 3 guncangan pada 3 sumbu selama 18 kali, dipakai pada ketinggian 70.000 kaki serta kecepatan dekompresi akibat penurunan ketinggian 7.000 kaki per menit, pada siklus kejutan temperatur, yaitu -40 °C selama 3 hari, kemudian dinaikkan ke temperatur 70 °C selama 3 hari lagi, sambil menaikkan kelembaban dari 5 % pada hari pertama menjadi 90 % di hari ketiga. Kondisi lain yang dapat diuji berdasarkan MIL-STD-810 adalah ketahanan komputer terhadap siklus uap garam selama 48 jam diikuti kondisi kering selama 48 jam, sebanyak 2 siklus tanpa jeda pada temperatur 35 °C. Masih banyak kondisi ekstrim lainnya yang dapat diujikan pada komputer berdasarkan standar MIL-STD-810 ini, seperti kondisi hujan, kejutan senjata, dan lain-lain. Karena standar yang tinggi, MIL-STD sering juga dipakai pada peralatan non-militer untuk menunjukkan tingginya kualitas peralatan tersebut.

Kendaraan tempur dan kendaraan taktis membutuhkan material tahan peluru untuk badan atau pun lantainya. Material tahan peluru pada prinsipnya adalah material yang permukaannya dapat memecah ujung peluru dan selanjutnya bagian dalamnya mampu menyerap energi kinetik peluru yang demikian besar. **Baja tahan peluru** (sering disebut **armor steel**) memiliki kekerasan dan ketangguhan yang tinggi, sesuai dengan standar antara lain MIL-DTL-46100 dan MIL-DTL-12560. Untuk mendapatkan karakteristik tersebut, komposisi baja diperkaya dengan unsur paduan kromium, nikel, molibdenum, titanium, mangan dan unsur lainnya serta diberi perlakuan panas khusus meliputi pengerasan dan temper. Kekerasan baja tahan peluru bervariasi antara 500 – 700 BHN, tergantung kebutuhan penggunaan. Nilai kekerasan ini sangat tinggi dibandingkan baja karbon rendah yang dipakai untuk kendaraan penumpang biasa, yaitu sekitar 125-200 BHN.

Kapal-kapal perang sebagian besar juga terbuat dari baja, sehingga ketika berlayar seakan-akan menjadi magnet besar yang sedang mengapung yang akan berinteraksi dengan medan magnet bumi. Distorsi dengan medan magnet bumi ini dapat memicu peralatan-peralatan sensitif, seperti ranjau. Oleh karena itu, kapal perang perlu di **degaussing** untuk menghilangkan medan magnet. Bahkan pada **kapal sapu ranjau**, material yang dipakai sebagai lambung kapal, sering kali adalah material yang benar-benar tidak menghasilkan medan magnet, seperti **komposit polimer** atau **baja non-magnetik (non-magnetic steel)**, agar tidak memicu ranjau aktif. Baja non-magnetik adalah baja yang memiliki kadar kromium dan nikel yang tinggi untuk mengubah fasa utama menjadi austenit, serta ditambahkan molibdenum dan mangan untuk meningkatkan kekuatannya. Fasa austenit inilah yang menyebabkan baja menjadi bersifat tidak magnetik.

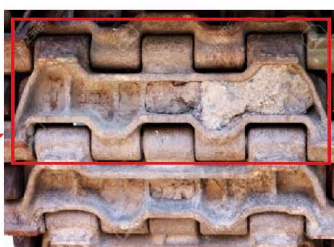
Pesawat militer, baik pesawat tempur maupun pesawat angkut, seringkali memakai **komposit berbasis polimer** sebagai bahan badan, sayap dan ekornya untuk mengurangi berat dan mengurangi **penampang radar (radar cross-section)** untuk menjadikan pesawat bersifat **siluman (stealth)**. Jenis serat yang dipakai pada komposit antara lain adalah serat karbon dan kevlar. Selain komposit laminat, yang juga dipakai pada pesawat militer adalah **komposit sandwich**, yaitu komposit yang terdiri dari inti dengan berat jenis yang rendah, diapit dengan dua lapis kulit di bagian luar. Inti yang dipakai dapat berupa *honeycomb* atau busa poliuretan, sementara kulit terbuat dari komposit serat bermatriks polimer atau lembaran aluminium.

Pengurangan berat material akan meningkatkan efisiensi pemakaian bahan bakar dan meningkatkan daya angkut. Selain menggunakan komposit berbasis polimer, pelapisan dengan cat **Radar Absorbant Material (RAM)** juga dapat meningkatkan sifat siluman.

Perlengkapan personel militer antara lain berupa rompi anti peluru, pakaian tempur, helm, ransel, sepatu. Rompi anti peluru dan helm anti peluru umumnya terbuat dari material komposit serat bermatriks polimer. Serat yang banyak dipakai antara lain adalah **Kevlar**, **Aramid** dan **Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)**. Untuk pakaian dan ransel militer diperlukan efek kamuflase, untuk menghindari deteksi oleh musuh. Untuk itu, selain menggunakan motif kamuflase, tekstil yang dipakai juga diberi pewarna **penyerap gelombang infra merah**, sehingga tidak terdeteksi oleh sensor CCD pada peralatan *night-vision*. Penyerap gelombang infra-merah yang ditambahkan pada tekstil tersebut antara lain berupa **partikel nano oksida indium timah putih (indium tinoxide/ITO)**. Perkembangan material yang dipakai pada dunia militer sangat menarik dan terus berkembang untuk meningkatkan daya gerak, daya tempur dan daya dukung pasukan.

Latihan

1. Coba perhatikan lingkungan sekeliling Anda di mana pun Anda berada saat ini. Sebutkan komponen, benda, atau barang yang ada di sekitar Anda yang termasuk:
 - a. Logam
 - b. Polimer
 - c. Keramik
 - d. Komposit
 - e. Material cerdas
 - f. Biomaterial
2. Apabila Anda menjumpai sebuah pohon maka coba amati. Termasuk jenis material apa saja bagian-bagian dari sebuah pohon?
3. Gambar di bawah adalah Medium Tank Harimau produksi PT. Pindad. Salah satu komponennya adalah roda rantai. Jelaskan jenis material yang umum dipakai sebagai kepingan roda rantai (*track link*).



BAB 2

STRUKTUR ATOM DAN IKATAN ANTAR-ATOM

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

1. Memahami struktur atom sesuai dengan konsep atom Bohr dan teori mekanika kuantum.
2. Menjelaskan ikatan ionik, kovalen, logam, hidrogen, dan van der Waals pada material.
3. Menghubungkan sifat material dengan ikatan antar-atom.

2.1 Pendahuluan

Beberapa sifat penting dari material padat bergantung pada susunan geometris atom dan interaksi di antara atom atau molekul penyusun. Pada bab ini, beberapa konsep dasar akan dibahas yang mencakup struktur atom, konfigurasi elektron di dalam atom, tabel periodik, serta beberapa tipe ikatan atom primer dan sekunder.

2.2 Struktur Atom

Konsep Dasar

Setiap atom memiliki inti yang terdiri atas proton dan neutron, serta dikelilingi oleh elektron yang berputar (mengelilingi inti atom). Elektron dan proton masing-masing memiliki muatan sebesar $1,60 \times 10^{-19}$ C, dimana elektron bermuatan negatif dan proton bermuatan positif, sementara neutron tidak bermuatan. Massa dari partikel penyusun atom ini sangat kecil; proton dan neutron memiliki massa yang hampir sama, yaitu $1,67 \times 10^{-27}$ kg. Massa keduanya jauh lebih besar daripada massa elektron, yang hanya $9,11 \times 10^{-31}$ kg.

Semua unsur kimia dinomori sesuai dengan jumlah proton di dalam intinya. Nomor ini dikenal sebagai nomor atom (Z). Untuk atom yang netral, nomor atom sama dengan jumlah elektron. Nomor atom merupakan bilangan bulat. Uranium, dengan nomor atom 92, merupakan unsur terberat yang ada secara alamiah.

Massa atom (A) dari sebuah atom adalah jumlah dari massa proton dan neutron dalam sebuah inti. Untuk sebuah unsur, meskipun jumlah proton sama, jumlah neutron dapat berbeda-beda. Jadi, sebuah unsur dapat memiliki dua atau lebih massa atom, yang disebut isotop. Satuan untuk massa atom adalah amu (*atomic mass unit*). Definisi dari 1 amu adalah $1/12$ massa atom isotop karbon 12 (^{12}C) ($A = 12,000000$).

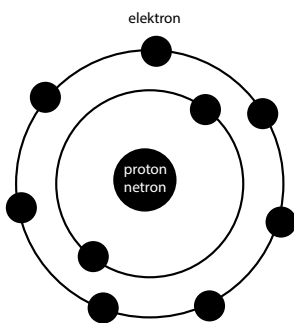
Berat atom dari sebuah unsur atau molekul dapat ditentukan berdasarkan amu (*atomic mass unit*) per atom atau massa per mol material. Dalam satu mol sebuah unsur, terdapat $6,023 \times 10^{23}$ (bilangan Avogadro) atom atau molekul.

Model Atom

Pada akhir abad ke-19, para ilmuwan menyadari bahwa banyak fenomena yang melibatkan elektron dalam padatan yang tidak dapat dijelaskan dengan mekanika klasik. Kemudian muncul teori yang disebut mekanika kuantum. Pemahaman terhadap perilaku elektron dalam atom dan padatan kristalin pasti melibatkan konsep mekanika kuantum. Akan tetapi, mekanika kuantum tidak akan dibahas secara mendalam dalam buku ini, hanya sebatas pengenalan dan pemahaman sederhana yang akan diberikan.

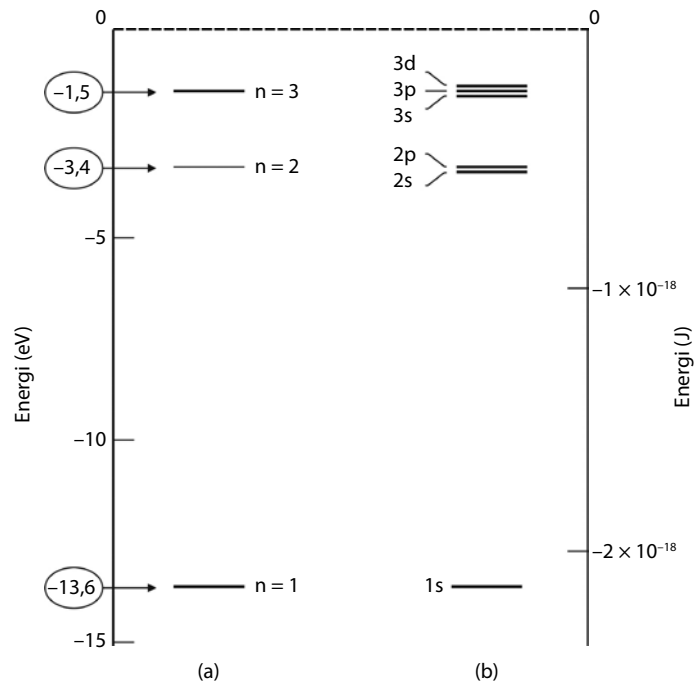
Model atom yang pertama kali diterima dengan luas adalah model atom Bohr, di mana elektron diasumsikan berevolusi mengelilingi inti atom dalam suatu orbit tertentu. Posisi dari sebuah elektron belum terdefinisi dengan baik selain dikatakan berada dalam sebuah orbital. Model atom ini ditampilkan pada Gambar 2.1.

Prinsip mekanika kuantum lain mengatakan bahwa energi dari elektron terkuantifikasi sedemikian hingga sebuah elektron hanya dapat memiliki energi yang tertentu. Elektron dapat mengubah energinya. Namun agar hal itu dapat terjadi, elektron harus melakukan lompatan kuantum ke tingkat energi yang lebih tinggi (dengan menyerap energi) atau ke tingkat energi yang lebih rendah (dengan melepaskan energi). Energi elektron yang diizinkan ini sering disebut dengan tingkat energi. Tingkat ini berbeda-beda secara jelas dan dipisahkan dengan besar energi tertentu. Sebagai contoh, tingkat energi yang diizinkan untuk sebuah atom hidrogen model Bohr digambarkan dalam Gambar 2.2a, yaitu energi dinyatakan negatif, di mana referensi nol adalah untuk elektron bebas atau tidak terikat. Tentu saja, elektron tunggal yang dimiliki oleh atom hidrogen hanya akan mengisi satu dari tingkat energi ini. Jadi, terlihat jelas bahwa model atom Bohr merupakan model awal untuk menjelaskan elektron dalam sebuah atom, meliputi posisi (orbital elektron) dan energinya (tingkat energi terkuantifikasi).

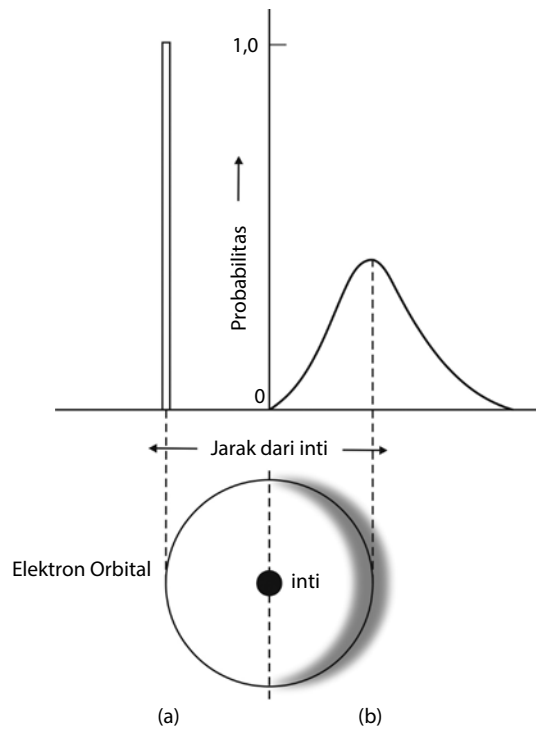


GAMBAR 2.1 Model atom Bohr.

Akan tetapi, yang terjadi kemudian adalah model atom Bohr tidak dapat menjelaskan beberapa fenomena yang berkaitan dengan elektron sehingga model atom mekanika gelombang muncul. Dalam model atom mekanika gelombang, elektron dianggap memiliki sifat sebagai gelombang dan partikel. Elektron tidak lagi dianggap sebagai sebuah partikel yang bergerak dalam orbital tertentu, tetapi sebagai sebuah kemungkinan dari keberadaan elektron pada beberapa lokasi di sekitar inti. Dengan kata lain, posisi elektron dijelaskan sebagai distribusi kemungkinan atau awan elektron. Gambar 2.3 membandingkan antara model atom Bohr dan mekanika gelombang



GAMBAR 2.2 (a) Tingkat energi yang diizinkan untuk sebuah atom hidrogen dengan model Bohr. (b) Perbandingan model atom Bohr dengan model mekanika gelombang.



GAMBAR 2.3 Perbandingan antara (a) model atom Bohr dan (b) mekanika gelombang dalam hal distribusi elektron.

untuk atom hidrogen. Kedua model ini akan digunakan dalam buku ini, dengan pilihan bergantung pada model mana yang dapat dijelaskan secara lebih sederhana.

Bilangan Kuantum

Menggunakan mekanika gelombang, seluruh elektron di dalam atom dicirikan dengan empat bilangan kuantum. Ukuran, bentuk, dan orientasi ruang dari sebuah elektron dijelaskan dengan tiga dari bilangan kuantum tersebut. Tingkat energi elektron—yang dalam model Bohr dijelaskan dalam satu orbital—dibagi dalam beberapa subkulit dan bilangan kuantum menunjukkan jumlah tingkat energi dalam setiap subkulit. Kulit dinyatakan dalam bilangan kuantum utama, n , yang merupakan bilangan integral dimulai dari satu. Terkadang, kulit ini diberi nama K , L , M , N , O , dan seterusnya, yang sama dengan $n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$, seperti yang terlihat pada Tabel 2.1. Perhatikan bahwa bilangan kuantum utama ini sama dengan orbital pada model Bohr, yang menunjukkan jarak dari elektron ke inti atom.

Bilangan kuantum yang kedua adalah l —yang menggambarkan subkulit—yang dinyatakan dalam huruf s , p , d , atau f , bergantung pada bentuk subkulit elektron. Jumlah subkulit maksimal adalah sebanyak n (lihat Tabel 2.1). Jumlah tingkat energi dalam setiap subkulit ditentukan oleh bilangan kuantum ml . Untuk subkulit s , hanya ada satu tingkat energi, sementara untuk subkulit s , p , d , dan f , masing-masing memiliki tiga, lima, dan tujuh tingkat energi (lihat Tabel 2.1). Tanpa ada medan magnet, tingkat energi dalam subkulit adalah sama. Namun demikian, jika ada medan magnet, subkulit ini akan terpisah, di mana masing-masing tingkat memiliki energi yang sedikit berbeda.

Semua elektron juga memiliki momen putar (spin), yang arahnya ke atas atau ke bawah. Bilangan kuantum yang keempat berhubungan dengan momen putar ini, m_s , di mana ada dua nilai yang mungkin, yaitu $+1/2$ dan $-1/2$, masing-masing satu untuk orientasi putar.

Jadi, model atom Bohr diperbaiki oleh model atom mekanika gelombang, dengan menambahkan tiga bilangan kuantum yang menggambarkan adanya subkulit di dalam setiap kulit. Perbandingan kedua model berdasarkan adanya subkulit ini diilustrasikan untuk atom hidrogen pada Gambar 2.2a dan Gambar 2.2b.

Konfigurasi Elektron

Bagian sebelumnya membahas mengenai tingkat energi, di mana merupakan tingkat energi yang diizinkan untuk dimiliki sebuah elektron. Pengisian tingkat energi ini ditentukan dengan menggunakan prinsip Larangan Pauli, yang juga merupakan suatu konsep mekanika kuantum. Prinsip Larangan Pauli menyatakan bahwa setiap tingkat energi hanya dapat diisi oleh dua buah elektron, yang harus memiliki putaran berlawanan. dengan demikian, subkulit s , p , d , dan f , masing-masing dapat memuat 2, 6, 10, dan 14 elektron. Tabel 2.1 memberikan jumlah maksimum elektron yang dapat mengisi keempat kulit pertama.

Tentu saja, tidak semua tingkat energi yang tersedia terisi oleh elektron. Umumnya, elektron mengisi kulit dengan tingkat energi terendah, di mana pada kondisi ini atom disebut berada dalam tingkat (energi) dasar. Konfigurasi elektron pada tingkat dasar ini merupakan

TABEL 2.1 Jumlah elektron yang tersedia pada beberapa kulit dan subkulit elektron.

Bilangan Kuantum Utama, n	Nama Kulit	Subkulit, l	Jumlah Tingkat Energi, m_l	Jumlah Elektron, m_s	
				Pada Setiap Subkulit	Pada Setiap Kulit
1	K	s	1	2	2
2	L	s	1	2	8
		p	3	6	
3	M	s	1	2	18
		p	3	6	
		d	5	10	
4	N	s	1	2	32
		p	3	6	
		d	5	10	
		f	7	14	

TABEL 2.2 Konfigurasi elektron dari beberapa unsur.

Unsur	Nomor Atom	Konfigurasi Elektron
Hidrogen	1	$1s^1$
Helium	2	$1s^2$ (stabil)
Litium	3	$1s^2 2s^1$
Berilium	4	$1s^2 2s^2$
Boron	5	$1s^2 2s^2 2p^1$
Karbon	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
.....		
Neon	10	$1s^2 2s^2 2p^6$ (stabil)
Natrium	11	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
Magnesium	12	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
Aluminium	13	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
.....		
Argon	18	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ (stabil)
.....		
Kripton	36	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6$ (stabil)

konfigurasi yang tertentu (lihat Tabel 2.2). Elektron yang berada pada kulit paling luar disebut elektron valensi. Keberadaan elektron valensi ini sangat penting, terutama jika berikatan dengan elektron dari atom lain dalam suatu ikatan antar-atom.

Selain itu, banyak sifat fisik dan kimia dari padatan yang ditentukan oleh elektron valensi. Elektron valensi juga dapat pindah ke tingkat energi yang lebih tinggi, yang akan menimbulkan sifat semikonduktif.

Beberapa atom disebut memiliki konfigurasi elektron yang stabil, yang artinya kulit terluar atom ini terisi penuh oleh elektron. Umumnya, kulit terluar yang terisi penuh tersebut adalah orbital s dan p dari kulit terluar, yang seluruhnya berjumlah delapan elektron. Sebagai contoh, neon (Ne), argon (Ar), dan krypton (Kr), kecuali helium (He), yang hanya memiliki dua elektron pada kulit terluar. Unsur-unsur ini (Ne, Ar, Kr, dan He) disebut unsur inert atau gas mulia, yang tidak reaktif. Sementara itu, unsur-unsur yang tidak memiliki konfigurasi elektron yang stabil akan cenderung melepaskan atau menarik elektron sehingga membentuk ion yang bermuatan, atau cenderung membagi elektronnya untuk dipakai bersama atom lain. Hal ini merupakan dasar dari beberapa reaksi kimia dan ikatan antar-atom dalam padatan.

Dalam beberapa kondisi khusus, orbital s dan p berkombinasi membentuk orbital hibrid sp^n , di mana n menunjukkan jumlah orbital p , yang bernilai 1, 2, atau 3. Unsur-unsur grup 3A, 4A, dan 5A dalam tabel periodik (Gambar 2.4) merupakan unsur yang paling sering membentuk hibrid. Tenaga pendorong pembentukan orbital adalah tingkat energi yang lebih rendah untuk elektron valensi. Untuk karbon, hibrid sp^3 sangat penting dalam pembentukan senyawa polimer dan organik. Hibrid sp^3 membentuk sudut 109° (tetrahedral) yang ditemukan di dalam rantai polimer.

2.3 Tabel Periodik

Seluruh unsur diklasifikasikan berdasarkan konfigurasi elektronnya di dalam tabel periodik (Gambar 2.4). Di dalam tabel periodik, unsur-unsur disusun sesuai urutan nomor atom dalam tujuh baris, yang disebut periode. Susunannya sedemikian rupa sehingga unsur yang terletak dalam satu kolom (disebut grup) memiliki struktur elektron valensi yang mirip, dengan demikian, juga memiliki sifat kimia dan sifat fisika yang mirip. Sifat-sifat ini berubah perlahan secara sistematis dengan bergerak secara horizontal pada periode yang sama.

Unsur yang terletak pada Grup VIIIA—grup unsur yang paling kanan—merupakan gas mulia yang memiliki konfigurasi elektron yang stabil. Grup VIIA dan VIA masing-masing memiliki tujuh dan enam elektron pada kulit terluar, sehingga kekurangan satu dan dua elektron untuk mencapai konfigurasi stabil. Grup VII A (F, Cl, Br, dan I) sering disebut sebagai unsur halogen. Logam alkali dan semi-alkali (Li, Na, K, Be, Mg, Ca, dan seterusnya) disebut Grup IA dan IIA, yang masing-masing memiliki satu dan dua buah elektron pada kulit terluar. Unsur-unsur pada periode ketiga yang panjang—Grup IIIB hingga IIB—disebut logam transisi, yang orbital d -nya sebagian terisi dan beberapa memiliki satu atau dua elektron pada kulit terluar. Grup IIIA, IVA, dan VA (B, Si, Ge, As, dan seterusnya) memiliki sifat di antara logam dan nonlogam, sesuai dengan susunan elektron valensinya.

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4 (tabel periodik), sebagian besar unsur merupakan logam. Terkadang, unsur ini disebut sebagai elektropositif karena mereka cenderung terluarnya sehingga membentuk ion positif.

PERIODE

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1A

2A

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

1

2

Copyright © 2010 Eni Generalic

DERET LANTHANIDA

(1) Pure Appl. Chem. **81**, No. 11, 2131–2156 (2009)
 Massa atom (relatif) ditunjukkan dengan lima angka penting. Untuk elemen-elemen yang tidak memiliki nukleida stabil, nilai massa atom ini diberi tanda kurung yang mengindikasikan nomor massa isotop dengan waktu hidup terlama/terpanjang. Bagaimanapun, tiga elemen (Tl, Pb, dan U) memiliki karakteristik isotop terestrial, sehingga massa atomnya ditampilkan.
 Editor: Aditya Vardhan
 aditya@netlinx.com
 Catatan: Kunjungi www.periodni.com untuk informasi lebih lanjut.

GAMBAR 2.4 Tabel periodik.

Sumber: Diadaptasi dari www.periodni.com.

Sementara itu, unsur yang terletak di sebelah kanan tabel periodik disebut sebagai elektronegatif karena mereka cenderung menerima elektron sehingga membentuk ion negatif. Secara umum, elektronegativitas dari unsur-unsur ini meningkat dari kiri ke kanan dan dari atas ke bawah pada tabel periodik.

2.4 Ikatan Atom pada Padatan

Ikatan atom pada padatan dapat dibagi menjadi dua, sebagai berikut.

1. Ikatan primer, yang umumnya dimiliki oleh atom-atom dalam benda padat, seperti logam, polimer, atau keramik. Berikut ini adalah tiga jenis ikatan primer.
 - a. Ikatan ionik
 - b. Ikatan kovalen
 - c. Ikatan logam
2. Ikatan sekunder, yang merupakan ikatan yang lemah, tetapi tetap memengaruhi sifat material. Berikut ini adalah dua jenis ikatan sekunder.
 - a. Ikatan van der Waals
 - b. Ikatan hidrogen

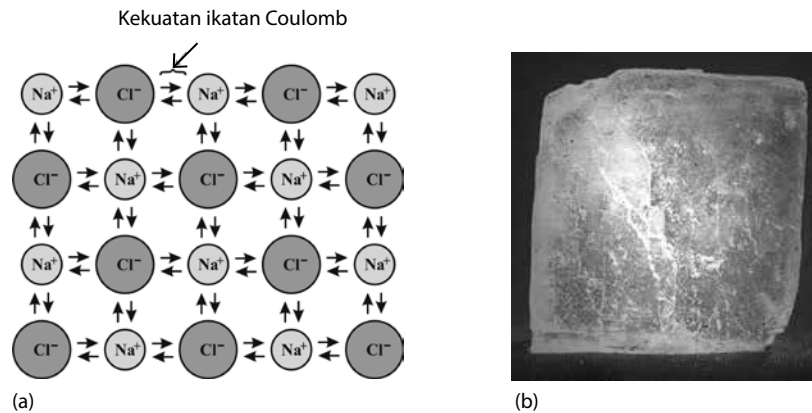
Ikatan Primer

Ikatan Ionik

Ikatan ionik adalah jenis ikatan yang paling mudah untuk dijelaskan dan digambarkan. Ikatan ini selalu dimiliki oleh senyawa yang terbuat dari unsur logam dan nonlogam, yaitu unsur-unsur yang terletak di ujung-ujung yang berjauhan pada tabel periodik. (Misal: Grup IA dan IIA berikatan dengan Grup VIA dan VIIA). Pada ikatan ini, unsur logam yang memiliki satu atau dua buah elektron pada kulit terluar cenderung melepaskan elektron valensinya sehingga menjadi ion positif. Elektron yang dilepas kemudian diterima oleh unsur nonlogam untuk melengkapi konfigurasi elektron pada kulit terluarnya—menjadi konfigurasi gas mulia—sehingga unsur ini menjadi ion negatif. Ion positif dan ion negatif ini kemudian saling tarik-menarik membentuk ikatan ionik. Ikatan ini digambarkan secara skematis pada Gambar 2.5. Contoh klasik dari material yang memiliki ikatan ionik adalah NaCl (natrium klorida atau sodium klorida). Na cenderung membentuk ion positif, Na^+ , dengan melepaskan satu elektron terluarnya. Kemudian, Na^+ diterima oleh atom Cl sehingga membentuk ion negatif, Cl^- . Kedua ion ini kemudian berikatan membentuk NaCl, yang kita temukan sebagai garam dapur dalam kehidupan sehari-hari.

Gaya tarik-menarik antara ion positif dan ion negatif disebut gaya Coulomb (E_A) yang besarnya bergantung pada jarak di antara kedua ion, sesuai persamaan berikut.

$$E_A = -\frac{A}{r} \quad (2.1)$$



GAMBAR 2.5 (a) Ilustrasi skematis dari ikatan ionik pada NaCl, (b) kristal NaCl.

Sumber: Diadaptasi dari http://www.surfacenet.de/html/picture_crystals.html.

Namun demikian, apabila kedua ion semakin berdekatan, maka interaksi di antara elektron valensi pada kedua ion akan menghasilkan gaya tolak-menolak (E_R), yang besarnya juga merupakan fungsi dari jarak antara kedua ion.

$$E_R = \frac{B}{r^n} \quad (2.2)$$

Pada kedua persamaan ini, A , B , dan n merupakan konstanta yang bergantung pada sistem ionik, sementara nilai n berkisar atau kurang lebih 8, dan r adalah jarak di antara kedua ion.

Besar ikatan ionik adalah sama ke semua arah di sekitar ion, atau bersifat *nondirectional*. Dengan demikian, agar material ionik stabil, seluruh ion positif harus memiliki tetangga bermuatan negatif pada seluruh arah tiga dimensi, demikian pula sebaliknya, ion negatif harus dikelilingi oleh ion positif.

Contoh material yang memiliki ikatan ionik sebagai ikatan utama adalah keramik. Pada material yang memiliki ikatan ionik, elektron terikat di dalam ion sehingga tidak tersedia elektron bebas untuk menghantarkan listrik atau panas. Akibatnya, material dengan ikatan ini umumnya bersifat isolator listrik dan panas. Energi ikatan antara ion positif dan ion negatif sangat tinggi, sekitar 600–1.500 kJ/mol (3–8 eV/atom), yang menyebabkan material ini memiliki kekuatan dan titik lebur yang tinggi. Energi ikat dan titik lebur dari beberapa material ionik dijelaskan oleh Tabel 2.3.

Ikatan Kovalen

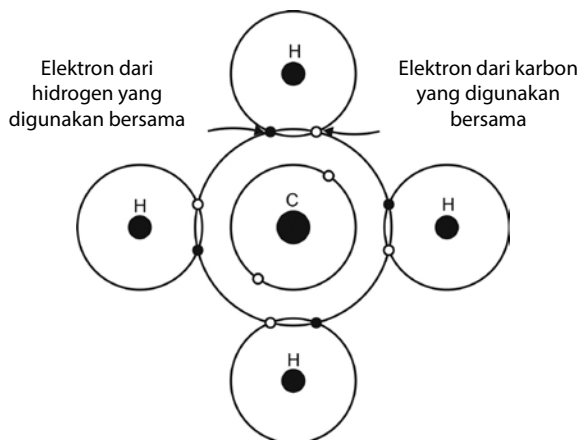
Pada ikatan kovalen, konfigurasi elektron yang stabil dicapai dengan cara pemakaian elektron secara bersama di antara dua atom yang berdekatan. Dua atom yang berikatan kovalen masing-masing akan menyumbangkan minimal satu elektron untuk dipakai bersama. Pada Gambar 2.6, ikatan kovalen digambarkan secara skematis untuk molekul metana (CH_4). Atom karbon memiliki empat elektron valensi, sementara masing-masing dari keempat atom hidrogen memiliki satu elektron valensi. Jadi, jika

TABEL 2.3 Energi ikat antar-atom dan titik lebur dari beberapa material.

Jenis Ikatan	Senyawa/Bahan	Energi Ikat		Titik Lebur (°C)
		kJ/mol (kkal/mol)	eV/atom, ion, molekul	
Ionik	NaCl	640 (153)	3,3	801
	MgO	1.000 (239)	5,2	2.800
Kovalen	Si	450 (108)	4,7	1.410
	C (intan)	713 (170)	7,4	> 3.550
Logam	Hg	68 (16)	0,7	-39
	Al	324 (77)	3,4	660
	Fe	406 (97)	4,2	1.538
	W	849 (203)	8,8	3.410
Van der Waals	Ar	7,7 (1,8)	0,08	-189
	Cl ₂	31 (7,4)	0,32	-101
Hidrogen	NH ₃	35 (8,4)	0,36	-78
	H ₂ O	51 (12,2)	0,52	0

Sumber: William D. Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, Edisi ke-8 (John Wiley & Sons, Inc., 2010).

atom-atom tersebut bergabung, atom hidrogen akan dapat mencapai kestabilan helium, sedangkan atom karbon dapat mencapai kestabilan neon (delapan atom pada kulit terluar). Karena elektron harus dipakai bersama, ikatan kovalen bersifat *directional*. Artinya, ikatan antara satu atom dan atom lainnya berada pada arah tertentu, di mana keduanya dapat saling berbagi atom.

**GAMBAR 2.6** Ilustrasi skematis dari ikatan kovalen pada molekul metana (CH₄).

Molekul nonmetal (H₂, Cl₂, F₂, dan lain-lain) atau molekul yang terdiri atas atom yang berbeda, seperti CH₄, H₂O, HNO₃, dan HF, memiliki ikatan kovalen. Ikatan kovalen juga dimiliki oleh unsur padatan, seperti intan (C, karbon), silikon, dan germanium, serta senyawa padat lainnya yang terletak di sebelah kanan tabel periodik [galium arsenida (GaAs), indium antimonida (InSb), dan silikon karbida (SiC)].

Ikatan kovalen dapat memiliki energi yang sangat tinggi, seperti pada intan, di mana merupakan material yang sangat keras dan memiliki titik lebur yang tinggi, yaitu > 3.550°C.

Namun demikian, ikatan kovalen juga dapat memiliki energi yang rendah, seperti pada bismuth, yang memiliki titik lebur 270°C. Energi ikat dan titik lebur dari beberapa material yang memiliki ikatan kovalen dapat dilihat pada Tabel 2.3. Material polimer memiliki ikatan kovalen sepanjang rantai utamanya yang terdiri atas atom karbon yang berikatan kovalen dengan atom hidrogen dan oksigen.

Material, dimungkinkan, untuk memiliki ikatan sebagian ionik dan sebagian kovalen, dan dalam kenyataannya, hanya sedikit senyawa yang memiliki ikatan ionik murni atau ikatan kovalen murni. Untuk senyawa, persentase atau jumlah masing-masing ikatan bergantung pada posisi relatif unsur dalam tabel periodik (Gambar 2.4) atau bergantung pada perbedaan elektronegativitas-nya. Semakin besar perbedaan golongan atau periodenya (yang artinya semakin besar perbedaan elektronegativitas), maka semakin ionik ikatannya. Sebaliknya, semakin dekat jarak kedua atom di dalam tabel periodik, semakin besar tingkat ikatan kovalennya. Persentase ikatan ionik antara atom A dan B (A dianggap sebagai unsur yang lebih elektronegatif) dapat diperkirakan berdasarkan rumus berikut.

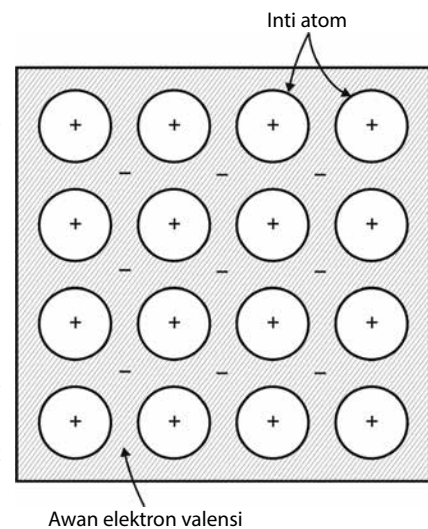
$$\% \text{ ikatan ionik} = \{1 - \exp[-(0,25)(X_A - X_B)^2]\} \times 100 \quad (2.3)$$

di mana X_A dan X_B adalah (sifat) elektronegativitas dari masing-masing unsur.

Ikatan Logam

Ikatan logam terdapat pada unsur logam, yang umumnya memiliki 3, 4, atau 5 elektron valensi. Atom-atom logam tersusun padat sehingga elektron valensi dari setiap atom tidak lagi terikat pada satu atom, namun bebas bergerak ke seluruh bagian logam. Elektron ini merupakan milik dari seluruh atom logam dan membentuk semacam “awan elektron” yang mengikat seluruh atom menjadi satu kesatuan. Ikatan logam digambarkan secara skematis pada Gambar 2.7. Besar muatan seluruh inti atom sama dengan muatan seluruh elektron, sehingga secara total logam tidak bermuatan. Selain itu, ikatan logam juga bersifat *nondirectional* karena besar energi ikatan sama ke seluruh arah. Tabel 2.3 menjelaskan energi ikat dan titik lebur dari beberapa logam. Sifat ikatan logam bisa lemah, tetapi bisa juga kuat, bervariasi antara 68 kJ/mol (0,7 eV/atom) untuk merkuri hingga 850 kJ/mol (8,8 eV/atom) untuk tungsten. Titik lebur masing-masing adalah -39 dan 3.410°C. Ikatan logam dimiliki oleh unsur Grup IA dan IIA, serta seluruh unsur logam.

Beberapa sifat material (keramik, polimer, dan logam) dapat dijelaskan berdasarkan jenis ikatannya. Sebagai contoh, logam bersifat konduktor listrik dan panas karena adanya “awan elektron” yang bebas bergerak menghantarkan listrik dan panas. Sebaliknya, material yang berikatan ionik dan kovalen cenderung bersifat sebagai isolator karena elektron valensinya terikat dan tidak bebas. Selain itu, pada temperatur kamar, logam cenderung bersifat ulet dan dapat dibengkokkan karena



GAMBAR 2.7 Ilustrasi skematis ikatan logam.

adanya “awan elektron” yang bertindak sebagai “lem” bagi atom-atomnya. Sebaliknya, material berikatan ionik (misal: keramik) bersifat getas karena adanya muatan listrik pada ion-ion penyusunnya.

Ikatan Sekunder

Ikatan sekunder sebenarnya selalu ada pada semua atom atau molekul. Karena sifat ikatannya yang sangat lemah, keberadaan ikatan sekunder dapat diabaikan dibandingkan dengan ikatan atom utama.

Ikatan van der Waals

Ikatan van der Waals sangat lemah jika dibandingkan dengan ikatan utama, di mana energi ikatnya hanya berkisar 10 kJ/mol (0,1 eV/atom). Ikatan van der Waals dimiliki oleh gas mulia yang konfigurasi elektronnya stabil. Dalam orbitalnya, simetri listrik dari beberapa atom atau molekul gas mulia dapat terdistorsi pada suatu saat, membentuk dua buah kutub berlawanan jenis (*dipole*). Dua kutub yang berbeda akan tarik-menarik dan membentuk ikatan yang lemah. Ikatan van der Waals juga terdapat pada molekul halogen terkondensasi, seperti Cl_2 , Br_2 , and I_2 , dalam keadaan cair dan padat.

Ikatan Hidrogen

Ikatan hidrogen merupakan ikatan sekunder yang paling kuat. Ikatan ini terjadi pada molekul polar, di mana atom hidrogennya terikat secara kovalen dengan atom lain, seperti fluor (pada HF), oksigen (pada H_2O), dan nitrogen (pada NH_3). Pada setiap ikatan H-F, H-O, atau H-N, elektron tunggal hidrogen dipakai bersama elektron lain. Akibatnya, ujung hidrogen dari ikatan tersebut merupakan proton yang tidak “tertutup” oleh elektron. Ujung molekul yang bermuatan sangat positif ini akan menarik ujung negatif dari molekul lain. Dalam ikatan ini, proton tunggal membentuk “jembatan” dengan dua atom lain yang bermuatan negatif. Kekuatan ikatan hidrogen umumnya lebih besar daripada kekuatan ikatan sekunder lainnya, dan besarnya dapat mencapai 51 kJ/mol (0,52 eV/molekul), seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.3. Titik lebur dan titik didih untuk HF dan air sangat tinggi; kontras jika dibandingkan dengan berat molekulnya yang rendah. Hal ini terjadi karena adanya ikatan hidrogen.

2.5 Material Kristalin dan Nonkristalin

Kristal Tunggal

Padatan kristalin adalah padatan yang susunan atomnya teratur dan berulang dalam jarak yang jauh. Apabila keteraturan ini terjadi pada seluruh bagian material tanpa terkecuali dan tanpa gangguan, maka material ini disebut sebagai kristal tunggal. Kristal tunggal dapat terjadi secara alamiah dan dapat dibuat di laboratorium. Kristal tunggal sangat sulit dibuat. Hal ini disebabkan pertumbuhan kristalnya harus diatur dan dijaga sedemikian rupa sehingga tidak terganggu oleh apa pun.

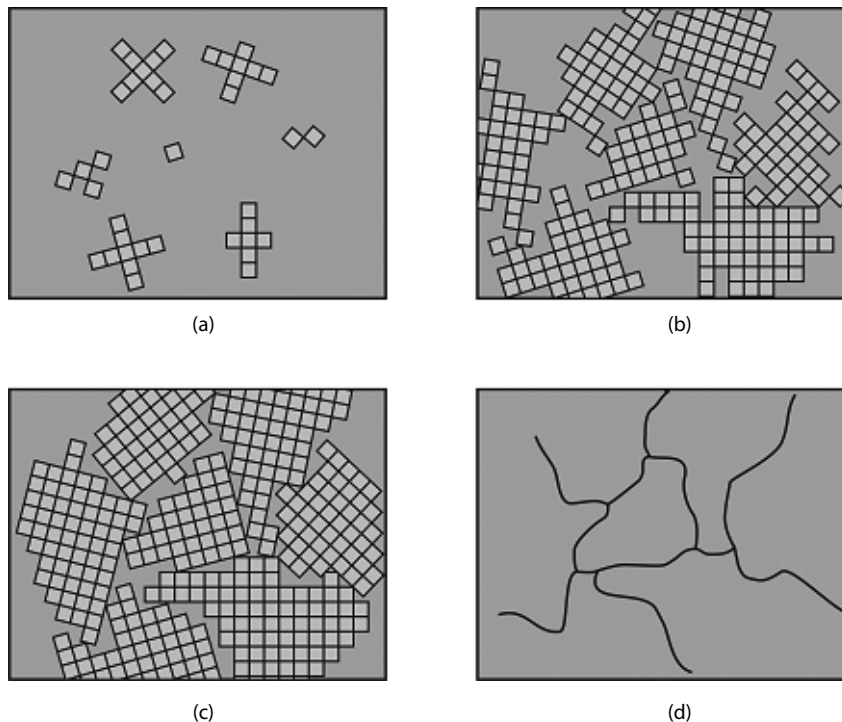
Jika kristal tunggal tumbuh tanpa adanya gangguan atau hambatan luar, kristal akan memiliki geometri yang teratur dengan permukaan yang datar, seperti halnya pada batu permata, yang bentuknya menggambarkan struktur kristalnya. Gambar 2.8 menunjukkan gambar sebuah kristal tunggal CaF_2 . Beberapa tahun belakangan ini, kristal tunggal sangat penting dalam teknologi modern, terutama sebagai material untuk sirkuit/rangkaian elektronik.



GAMBAR 2.8 Kristal tunggal CaF_2 .
Sumber: www.surfacenet.de/html/picture_crystals.html.

Material Polikristal

Hampir seluruh padatan kristalin yang ditemui dalam kehidupan sehari-hari merupakan material yang terdiri atas banyak kristal atau butir yang berukuran kecil. Material ini disebut sebagai material polikristalin. Secara konvensional, material polikristalin terbentuk melalui proses pembekuan (lihat Gambar 2.9). Mula-mula, kristal kecil/inti pada beberapa tempat terbentuk. Masing-masing inti tersebut memiliki arah kristalografis yang berbeda-beda, seperti ditunjukkan oleh arah kotak-kotak pada setiap inti. Kristal/butir kecil ini kemudian tumbuh dengan penempelan atom lain dari cairan pada tempat sesuai struktur yang sudah ada. Akhirnya, menjelang akhir proses pembekuan, tepi dari masing-masing butir bersinggungan hingga akhirnya seluruh atom cairan telah menempati struktur kristal masing-masing.



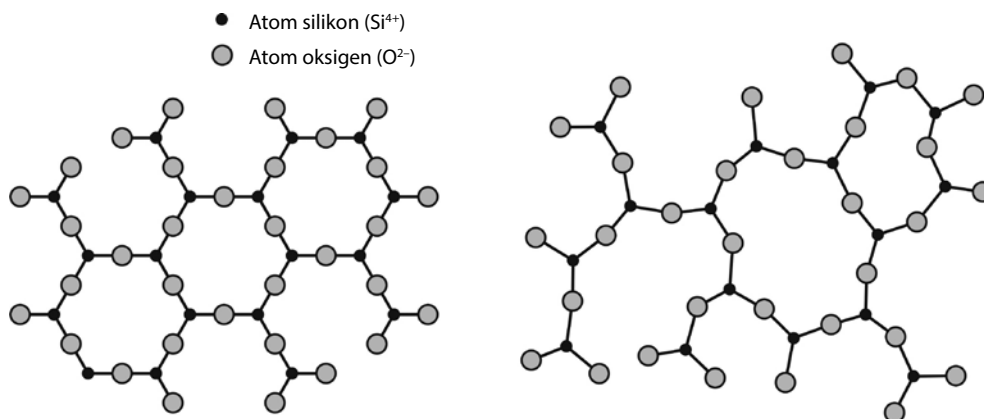
GAMBAR 2.9 Ilustrasi skematis dari beberapa tahap pembekuan material polikristalin, kotak menggambarkan satu sel satuan; (a) inti kristal; (b) pertumbuhan kristal, terlihat adanya perusakan beberapa butir yang saling bersebelahan; (c) setelah proses solidifikasi selesai, butir dengan bentuk tak teratur telah terbentuk; (d) struktur butir yang tampak di bawah mikroskop, di mana garis berwarna gelap adalah batas butir.

Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9, arah kristalografis berbeda antara satu butir dan butir lainnya. Batas pertemuan antarbutir terlihat acak, dan hal ini disebut dengan batas butir. Material yang memiliki banyak butir seperti ini disebut sebagai material polikristal. Sebagian besar logam dan keramik merupakan material kristalin.

Material Nonkristalin (Amorf)

Material nonkristalin tidak memiliki struktur atom yang teratur dan berulang dalam jarak yang jauh. Material nonkristalin disebut juga material amorf. Perbedaan antara material kristalin dan amorf diilustrasikan untuk silika (SiO_2), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Silika dapat berada dalam kedua kondisi tersebut, kristalin dan amorf, bergantung pada temperatur dan tekanan yang dialaminya. Perhatikan Gambar 2.10, struktur silika, secara dua dimensi, di mana setiap atom silikon terikat secara kovalen dengan dua buah atom oksigen. Susunan di antara masing-masing molekul silika teratur dan berulang, disebut berstruktur kristalin, sementara hal yang berbeda ditemui pada Gambar 2.10b, yang disebut sebagai struktur amorf.

Apakah struktur suatu material kristalin atau amorf, bergantung pada tingkat kesulitan atom-atom dalam kondisi cair yang acak untuk menyusun diri menjadi teratur dalam keadaan padat. Umumnya, material polimer bersifat amorf karena penyusunan rantai utama polimer selama proses polimerisasi lebih mudah terjadi tanpa keteraturan. Sebaliknya, atom-atom logam dan keramik memiliki energi terendah dalam keadaan padat jika tersusun secara teratur. Namun demikian, perkembangan teknologi menunjukkan bahwa struktur logam dapat dibuat amorf dengan cara membekukan logam cair secara cepat (*rapid solidification*) sehingga atom-atomnya tidak memiliki kesempatan untuk mengatur diri menjadi kristal. Struktur polimer juga dapat dibuat kristalin dengan menambahkan zat aditif dan mengatur proses polimerisasi.



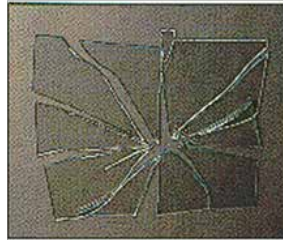
GAMBAR 2.10 Struktur kristal SiO_2 : (a) kuarsa, kristalin, dan (b) gelas, amorf.

Sumber: William D. Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Edisi ke-8 (John Wiley & Sons, Inc., 2010).

Latihan

1. a. Apakah yang dimaksud dengan isotop?
b. Mengapa berat atom dari sebuah unsur bukan bilangan bulat?
2. a. Sebutkan dua konsep mekanika kuantum yang berhubungan dengan model atom Bohr.
b. Sebutkan dua konsep tambahan akibat model atom mekanika kuantum.
3. Dalam hubungannya dengan elektron dan orbital elektron, jelaskan arti dari masing-masing keempat bilangan kuantum.
4. Dalam kaitannya dengan konfigurasi elektron, apakah persamaan di antara unsur-unsur dalam Grup/Golongan IIA pada tabel periodik.
5. Hitung besar energi gaya tarik-menarik antara ion-ion Ca^{2+} dan O^{2-} yang terpisah pada jarak 1,25 nm.
6. Jelaskan perbedaan utama antara ikatan ionik, kovalen, dan logam.
7. Jelaskan mengapa material yang berikatan kovalen cenderung kurang padat jika dibandingkan dengan material yang berikatan logam atau ionik.
8. Buatlah grafik energi ikat vs titik (temperatur) lebur berdasarkan data pada Tabel 2.3. Menggunakan grafik ini, perkirakan berapa energi ikat tembaga yang memiliki titik lebur 1.084°C .
9. Jelaskan ikatan atom yang terdapat pada material-material berikut.
 - a. Kuningan/*brass* (paduan Cu–Zn).
 - b. Karet.
 - c. Barium sulfat (BaS).
 - d. Xenon padat.
 - e. Perunggu/*bronze* (paduan Cu–Sn).
 - f. Nilon.
 - g. Aluminium fosfat (ALP).
 - h. Keramik SiO_2
 - i. Pasir SiO_2
 - j. Polipropilen
 - k. Es
 - l. Aluminium
10. Jelaskan mengapa HF memiliki titik didih lebih tinggi daripada HCl ($19,4^\circ\text{C}$ vs 85°C), meskipun HF memiliki berat molekul yang lebih rendah.
11. Berdasarkan ikatan hidrogen, jelaskan sifat anomali air yang memuai jika dibekukan.
12. Apabila pecah, gelas “di-anil” akan memiliki pecahan yang tajam dan relatif besar, sedangkan gelas yang “di-temper” akan memiliki pecahan halus dan tidak tajam (lihat gambar di bawah).

Jelaskan mengapa hal tersebut terjadi dilihat dari sudut pandang ikatan atom dan struktur material.



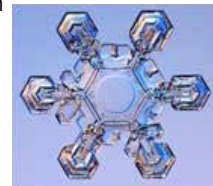
Gelas "Di-anil"



Gelas "Di-temper"

13. Gambar di sebelah kanan adalah sebuah kristal salju, yang mana umum ditemui selama musim dingin bersalju.

- Jelaskan perbedaan antara kristal salju dan air, dalam hal ikatan atom dan kristalinitas.
- Bandingkan berat jenis salju dan air. Jelaskan jawaban Anda.



14. Gambar berikut ini adalah gambar yang berhubungan dengan SiO_2 (silika).



Gambar sebelah kiri adalah tambang silika yang memproduksi pasir silika berkadar 99,9% silika (gambar tengah). Pasir silika adalah bahan utama untuk membuat gelas. Gambar di sebelah kanan adalah gel silika (*silica gel*) yang merupakan bentuk koloidal dari silika H_2SiO_3 . Titik lebur pasir silika dan gel silika, masing-masing, adalah 1.830 dan 1.600°C.

- Jelaskan perbedaan antara pasir silika dan gel silika dalam hal ikatan atom dan kristalinitas.
 - Prediksi kekuatan ikatan atom di dalam pasir silika dan gel silika. Manakah yang lebih kuat? Mengapa? Jelaskan jawaban Anda.
15. Jika sebuah balok es bertemperatur -5°C dipanaskan maka akan memuai hingga es mulai mencair. Selama mencair, temperaturnya tetap 0°C , namun volumenya menurun. Jika terus dipanaskan, ia akan terus menciut (volume menurun) hingga mencapai temperatur 4°C , dan kemudian baru selanjutnya akan mulai memuai. Jelaskan anomali penciutan air pada temperatur 4°C berdasarkan ikatan atomnya.

SIFAT MATERIAL

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

1. Memahami konsep tegangan dan regangan pada material.
2. Memahami Hukum Hooke.
3. Mendefinisikan rasio Poisson.
4. Memahami prinsip teknik pengujian tarik material.
5. Mampu menentukan: (a) kekuatan tarik, (b) kekuatan luluh, (c) kekakuan, dan (d) keuletan suatu material berdasarkan grafik tegangan-regangannya.
6. Menghitung keuletan menggunakan persen elongasi dan reduksi penampang.
7. Memahami prinsip teknik pengujian kekerasan material.
8. Memahami prinsip teknik pengujian ketangguhan material.
9. Memahami sifat fisik material.
10. Memahami sifat kimia material.

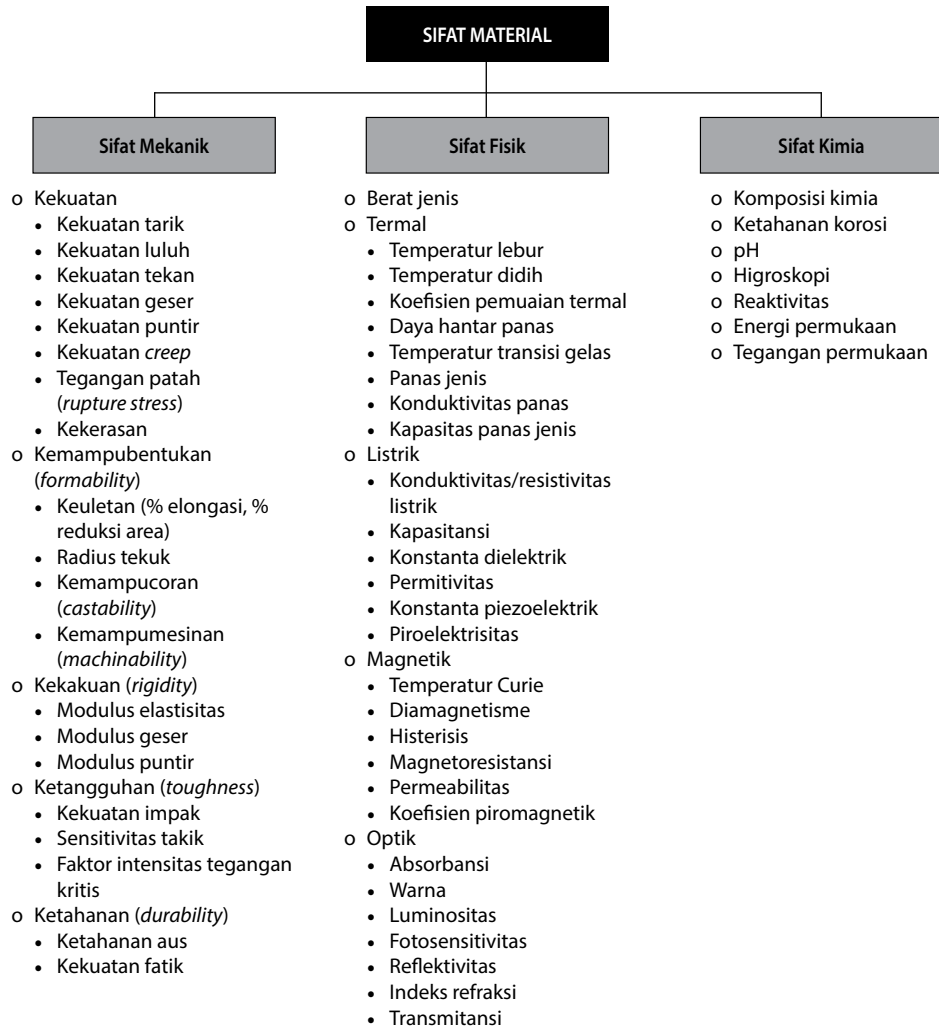
3.1 Pendahuluan

Pada dasarnya, sifat material adalah respons material terhadap sesuatu. Seperti halnya manusia, sifat manusia adalah respons manusia terhadap hal yang dialaminya. Sebagai contoh, respons seseorang ketika mengalami kejutan yang tidak disenangi. Bila dia segera marah, sifat orang tersebut adalah pemarah. Bila dia tetap tenang dan berusaha meredam kemarahannya maka sifat orang tersebut adalah penyabar. Demikian pula dengan material. Pemberian beban kejut pada material, misalnya. Apabila material tersebut langsung patah, sifat material tersebut adalah getas. Apabila material tersebut menjadi sangat bengkok, sifat material tersebut adalah ulet. Apabila material tersebut hanya mengalami sedikit pembengkokan maka sifat material tersebut adalah tangguh.

Berdasarkan ekspos yang diterima material, sifat material dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok, sebagai berikut.

1. **Sifat mekanik**, yaitu respons material terhadap beban mekanik.
2. **Sifat fisik**, yaitu respons material terhadap paparan fisik, seperti cahaya, medan magnet, medan listrik, dan lain-lain.
3. **Sifat kimia**, yaitu respons material terhadap zat kimia.

Berbagai jenis sifat material dapat dilihat pada Gambar 3.1. Pada buku ini, penekanan diberikan lebih besar pada sifat mekanik material, sedangkan untuk sifat fisik dan sifat kimia hanya diberikan secara garis besar saja.



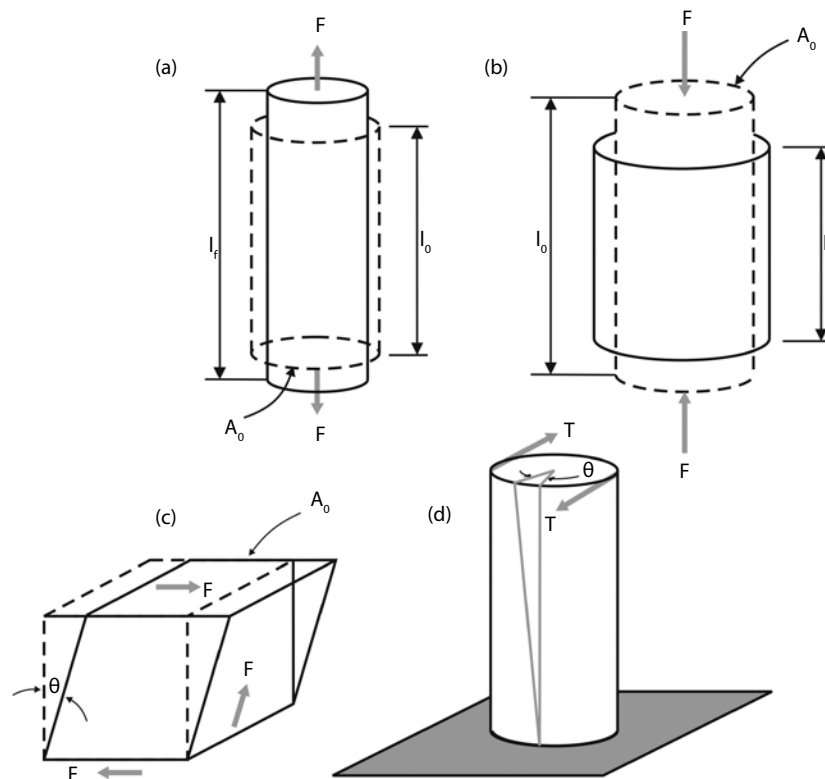
GAMBAR 3.1 Berbagai sifat material.

3.2 Sifat Mekanik Material

Sifat mekanik material mencerminkan hubungan antara beban atau gaya yang diberikan terhadap respons atau deformasinya.

Berikut adalah bentuk beban.

1. **Statik** (beban yang berubah secara lambat terhadap waktu dan diberikan secara seragam di seluruh penampang): Tarik, tekan, geser, torsi, tekuk. Ilustrasi pembebanan statik ini dapat dilihat pada Gambar 3.2, sedangkan beberapa contoh nyata dari bentuk beban tersebut tersaji pada Gambar 3.3.
2. **Impak** (beban mendadak).
3. **Dinamik** (beban yang berfluktuasi pada suatu periode waktu).



GAMBAR 3.2 Ilustrasi skematis dari deformasi yang terjadi akibat pembebanan: (a) Tarik, (b) tekan, (c) geser, dan (d) torsi. Garis penuh adalah dimensi benda setelah pembebanan, sedangkan garis putus-putus adalah dimensi benda sebelum pembebanan.

Keterangan: F = beban
 T = torsi
 A_0 = luas potongan melintang bidang yang tegak lurus bidang sebelum bahan diberikan beban
 l_0 = panjang awal material, sebelum diberikan beban
 l_f = panjang material setelah diberikan beban
 θ = sudut perubahan bidang ketika diberikan beban

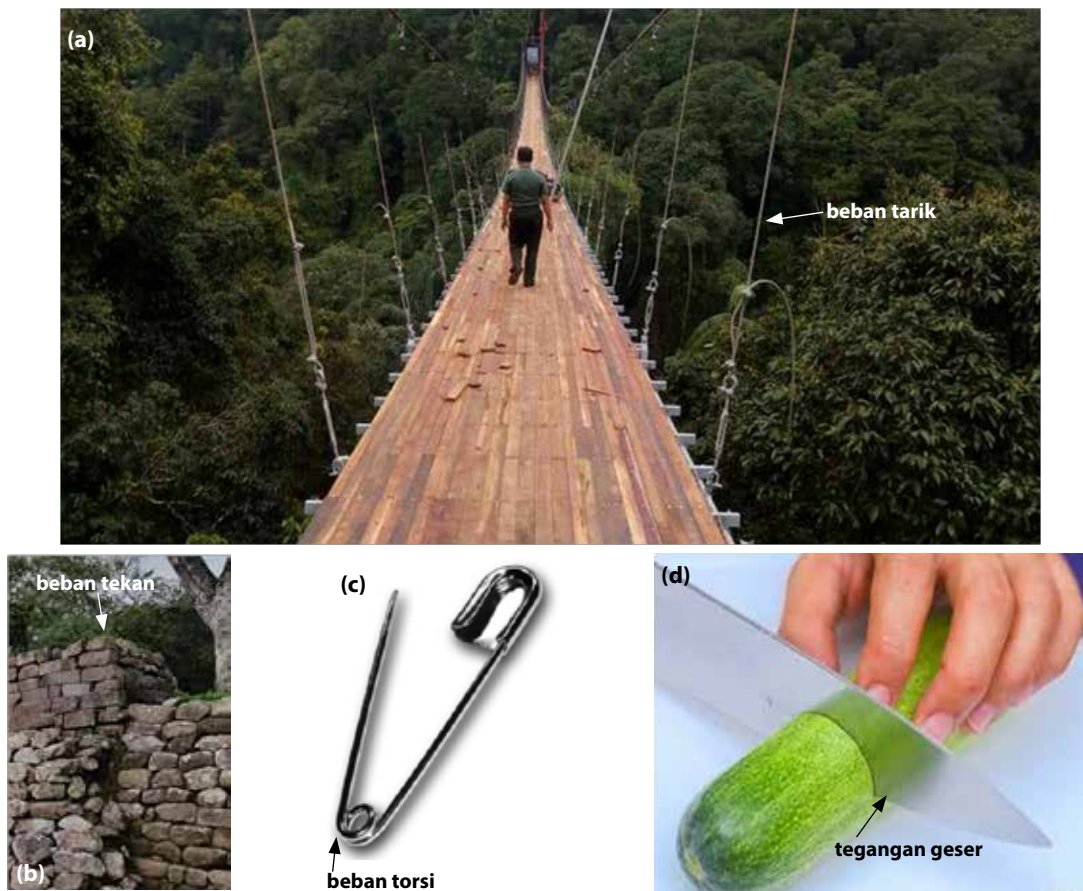
Sifat mekanik termasuk:

1. Kekuatan: tarik, tekan, geser, fleksural, tekuk.
2. Impak.
3. Fatik/kelelahan.
4. Keuletan, kerapuhan.
5. Kekerasan.
6. Ketahanan aus.

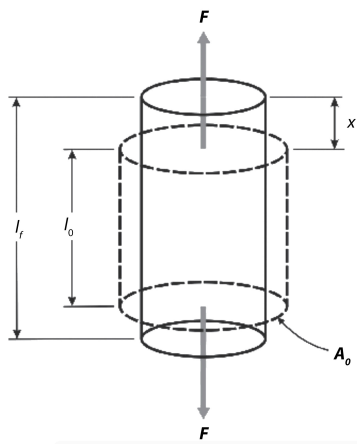
Namun demikian, topik yang akan dibahas dalam buku ini—sesuai dengan ruang lingkup Pengantar Material Teknik—hanyalah kekuatan tarik, impak, dan kekerasan.

3.3 Konsep Tegangan dan Regangan

Apabila beban statik diberikan pada material maka material akan berubah bentuk (berdeformasi). Jika kita mengikuti besar deformasi sebagai fungsi beban, kita akan memperoleh informasi mengenai “perilaku” dari material. Perhatikan Gambar 3.4.



GAMBAR 3.3 (a) Jembatan gantung Pasanggrahan Sukabumi, Jawa Barat. Kabel vertikal mengalami beban tarik (diadaptasi dari: <https://www.pikiran-rakyat.com/jawa-barat/2018/01/07/jembatan-gantung-terpanjang-wisata-baru-sukabumi-417363>).
 (b) Struktur batu pada Candi Sukuh, Karanganyar, Jawa Tengah. Batu bagian atas memberi beban tekan pada batu dibawahnya.
 (c) Beban torsi yang dialami oleh per peniti ketika ditutup.
 (d) Pisau memberikan tegangan geser sehingga ketimun terpotong.



GAMBAR3.4 Konsep tegangan dan regangan pada material yang diberi beban.

Keterangan: F = beban
 A_0 = luas potongan melintang bidang yang tegak lurus bidang sebelum bahan diberikan beban
 l_0 = panjang awal material, sebelum diberikan beban
 l_f = panjang material setelah diberikan beban
 x = selisih antara l dan l_0

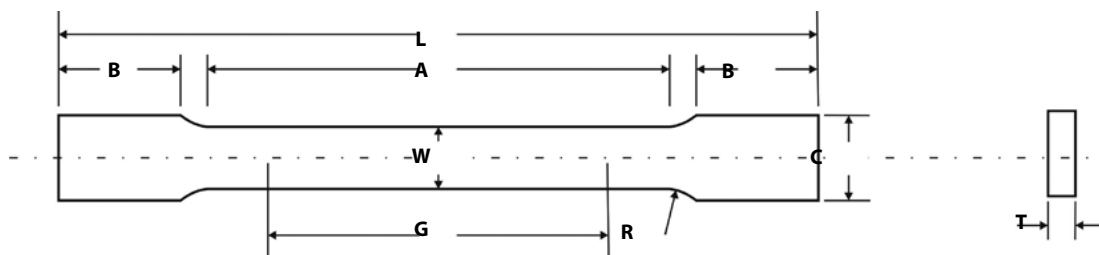
Variabel F adalah beban yang diberikan tegak lurus terhadap potongan melintang bidang dan dinyatakan dalam satuan beban (berat atau massa), yaitu Newton atau kg. Sementara itu, A_0 adalah luas potongan melintang bidang yang tegak lurus bidang sebelum bahan diberi beban. Tegangan (σ) adalah intensitas beban yang didistribusikan di dalam material, yang menghambat perubahan bentuk, di mana sesuai dengan persamaan berikut.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

Satuan dari σ adalah MPa (megapascal), di mana $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$. Deformasi digunakan sebagai istilah umum untuk perubahan bentuk dari sebuah benda atau material, dan dinyatakan dalam regangan (ϵ), yang merepresentasikan perubahan panjang dari sebuah benda.

$$\epsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.2)$$

dengan l_0 adalah panjang awal material sebelum diberikan beban, l_f adalah panjang akhir material. Regangan (ϵ) tidak memiliki unit, dan sering dinyatakan dalam m/m, in/in, atau dalam persentase, setelah dikalikan dengan 100%.

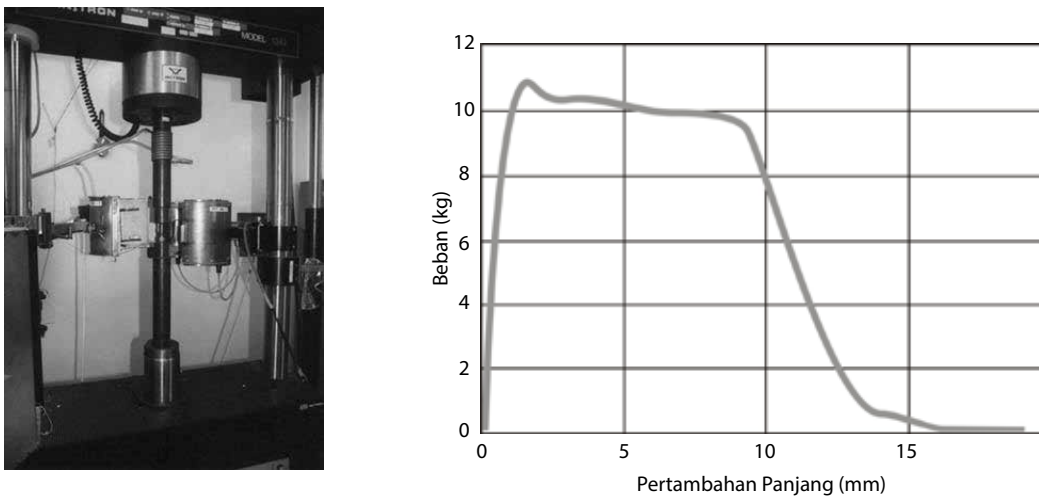


Dimensi (dalam mm)				
		Spesimen Standar		Spesimen Kecil (berukuran 6 mm)
		Tipe Pelat (40 mm)	Tipe Lembaran (12,5 mm)	
G	= Panjang ukuran	$200,0 \pm 0,2$	$50,0 \pm 0,1$	$25,0 \pm 0,1$
W	= Lebar	$40,0 \pm 2,0$	$12,5 \pm 0,2$	$6,0 \pm 0,1$
T	= Ketebalan	Ketebalan material		
R	= Jari-jari kelengkungan (<i>fillet</i>), min.	25	12,5	6
L	= Panjang keseluruhan	450	200	100
A	= Panjang bagian tereduksi, min.	225	57	32
B	= Panjang bagian pegangan	75	50	30
C	= Lebar bagian pegangan, kurang lebih	50	20	10

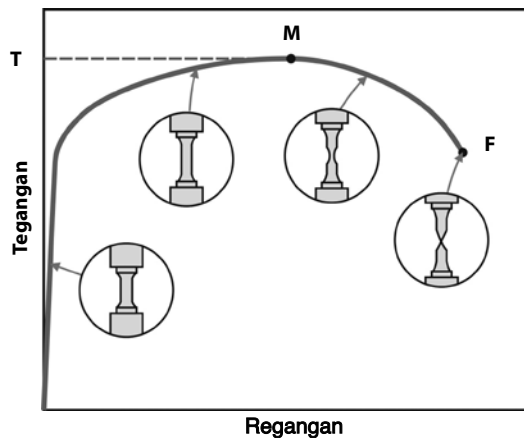
GAMBAR 3.5 Standar dimensi spesimen uji tarik untuk benda berbentuk pelat, berdasarkan ASTM (American Standard Testing and Materials) E8.

3.4 Pengujian Tarik

Cara umum untuk mengetahui sifat mekanik dari material adalah dengan melakukan pengujian tarik, menggunakan bentuk spesimen seperti tulang (lihat Gambar 3.5) dengan ukuran sesuai standar (ASTM, JIS, BS, dan lain-lain). Spesimen kemudian dipasang dalam mesin uji tarik (lihat Gambar 3.6a) dan diberi beban statik yang meningkat secara perlahan sampai spesimen akhirnya patah. Selama pembebanan, mesin merekam pertambahan beban dan perpanjangan spesimen dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 3.6b. Grafik ini kemudian dikonversi ke dalam grafik tegangan dan regangan dengan menggunakan persamaan sebelumnya, yang bentuk umumnya seperti pada Gambar 3.7. Dari Gambar 3.7, kita dapat menganalisis sifat mekanik (tarik) dari material, yang dapat dibagi dalam: (1) daerah deformasi elastis dan (2) daerah deformasi plastis.



GAMBAR 3.6 (a) Mesin uji tarik, (b) plot pertambahan beban vs pertambahan panjang yang direkam oleh mesin uji tarik.



GAMBAR 3.7 Grafik tegangan-regangan material. M= Titik maksimum, F=Titik patah, T= Tegangan maksimum

Deformasi Elastis

Deformasi elastis terjadi di awal pembebanan ketika pembebanan masih sangat rendah, di mana tegangan dan regangan berbanding lurus (*lihat Gambar 3.8*) mengikuti **Hukum Hooke**, sebagai berikut.

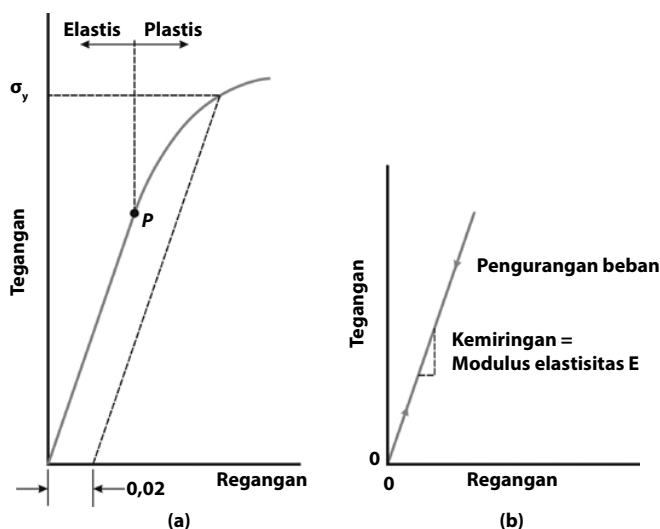
$$\sigma = E \varepsilon \quad (3.3)$$

dimana σ = Tegangan, E = Modulus elastisitas dan ε = Regangan

Deformasi ketika tegangan dan regangan berbanding lurus disebut sebagai deformasi elastis. Hubungan linear antara tegangan dan regangan dapat diperhatikan pada Gambar 3.8b. Kemiringan dari bagian linear ini adalah sama dengan modulus elastisitas, yaitu **E (Modulus elastisitas)** yang menggambarkan kekakuan (*stiffness*) material. Semakin besar modulus (semakin curam kemiringan grafik tegangan-regangan) maka semakin kaku material tersebut. Artinya, jika material diberikan suatu beban tertentu, material tersebut akan mengalami deformasi elastis yang lebih kecil. Material yang kaku sangat dibutuhkan untuk aplikasi struktural, seperti aplikasi pada jembatan, menara, gedung, dan bangunan lainnya. Dengan demikian, apabila diberikan beban yang berat, struktur tidak akan melendut (berlekuk ke bawah) atau terdeformasi.

Variabel E adalah **modulus Young** atau **modulus elastisitas**, yang satuannya sama dengan tegangan (σ), yaitu N/m^2 , atau Pa. Untuk sebagian besar logam, besar modulus bervariasi antara 45 GPa, untuk magnesium, hingga 407 GPa, untuk tungsten. Modulus elastisitas dari beberapa logam ditampilkan pada Tabel 3.1.

Deformasi elastis bersifat tidak permanen. Ketika beban dilepas, spesimen akan kembali ke bentuk awal. Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.8b, pembebanan sama artinya dengan menggerakkan material dari posisi awal mengikuti garis lurus, dan ketika beban dilepas, garis berbalik ke posisi awal kembali. Dalam skala atomik, deformasi elastis diartikan sebagai perubahan



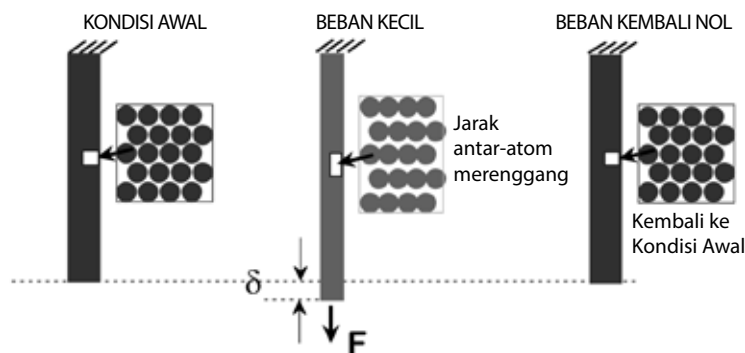
GAMBAR 3.8

(a) Daerah deformasi elastis dari grafik tegangan-regangan, (b) konsep kekakuan/modulus elastisitas pada material. P adalah batas proporsional, saat deformasi elastis berubah menjadi deformasi plastis.

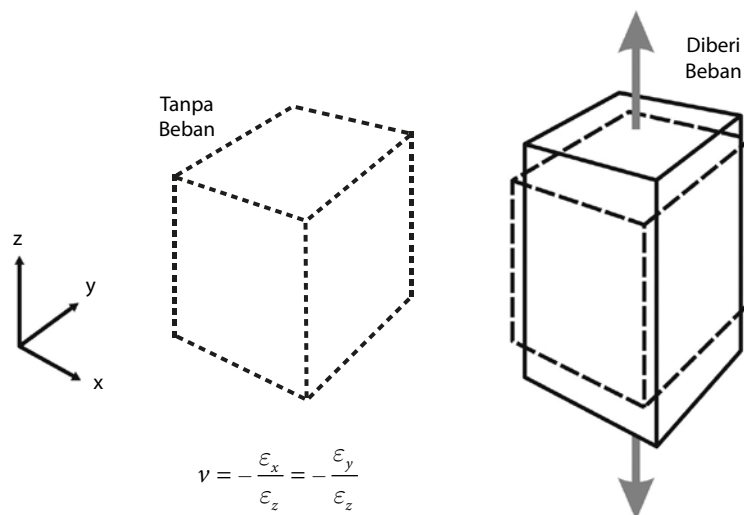
TABEL 3.1 Modulus elastisitas dan modulus geser, serta rasio Poisson (Poisson's ratio) dari beberapa logam pada temperatur kamar.

Logam Paduan	Modulus Elastisitas		Modulus Geser		Rasio Poisson
	GPa	10 ⁶ psi	GPa	10 ⁶ psi	
Aluminium	69	10	25	3,6	0,33
Kuningan	97	14	37	5,4	0,34
Tembaga	110	16	46	6,7	0,34
Magnesium	45	6,5	17	2,5	0,29
Nikel	207	30	76	11,0	0,31
Baja	207	30	83	12,0	0,30
Titanium	107	15,5	45	6,5	0,34
Tungsten	407	59	160	23,2	0,28

Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.



GAMBAR 3.9 Ilustrasi atomik pada saat deformasi elastis terjadi.



GAMBAR 3.10 Perpanjangan aksial (pada arah z) dan perpendekan lateral (pada arah x dan y, dan diberi tanda negatif) sebagai akibat pembebanan tarik. Garis penuh adalah dimensi benda setelah diberi pembebanan, dan garis putus-putus adalah dimensi benda sebelum pembebanan.

kecil pada jarak antar-atom dan teregangnya ikatan antar-atom. Apabila dianalogikan bahwa ikatan di antara dua buah atom sama dengan pegas maka deformasi elastis adalah peregangan pegas, yang akan kembali ke posisi semula jika tegangan dilepaskan (lihat Gambar 3.9).

Ketika tegangan tarik diberikan pada sebuah material, perpanjangan pada arah beban akan terjadi (sering disebut pada arah z), ϵ_z , Gambar 3.10. Akibat perpanjangan pada arah ini, perpendekan terjadi pada arah lateral (arah x dan y), yang disebut sebagai ϵ_x dan ϵ_y . Apabila tegangan yang diberikan adalah satu arah (uniaksial pada arah z), dan material bersifat isotropik, di mana $\epsilon_x = \epsilon_y$, maka sebuah parameter yang disebut **rasio Poisson** (*Poisson's ratio*) dapat didefinisikan sebagai rasio antara regangan lateral dan regangan aksial, atau sesuai dengan persamaan berikut.

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (3.4)$$

Tanda negatif selalu dimasukkan dalam Persamaan (3.4) sehingga nilai ν selalu positif karena ϵ_x dan ϵ_z selalu berlawanan tanda. Untuk sebagian besar logam, nilai rasio Poisson berkisar antara 0,25 dan 0,35 (lihat Tabel 3.1).

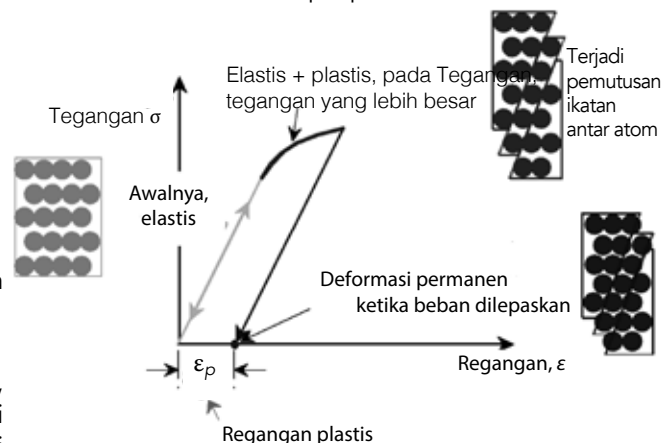
Deformasi Plastis

Pada sebagian besar logam, deformasi elastis hanya terjadi hingga regangan mencapai 0,005. Apabila material terus dideformasi, tegangan tidak lagi berbanding lurus dengan regangan sehingga Hukum Hooke tidak lagi berlaku. Deformasi menjadi permanen dan tidak dapat balik, di mana jika beban dilepas, benda tidak kembali ke bentuk awalnya. Akibatnya, kita katakan bahwa benda sudah mengalami deformasi plastis. Gambar 3.8a menunjukkan grafik tegangan dan regangan ketika masuk daerah plastis.

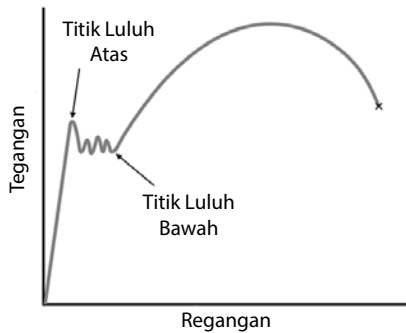
Dari perspektif atom, deformasi plastis berhubungan dengan pemutusan ikatan dengan atom tetangga asal dan pembentukan ikatan dengan tetangga yang baru. Jadi, ketika beban dilepas, benda tidak dapat kembali ke bentuk semula (Gambar 3.11).

Titik di mana deformasi elastis berubah menjadi plastis disebut batas elastis atau **batas proporsional**, yang ditunjukkan oleh titik P pada Gambar 3.8a. Terkadang, posisi titik P agak sulit untuk ditentukan. Hal ini disebabkan titik berhenti proporsionalitas antara tegangan dan regangan tidak jelas.

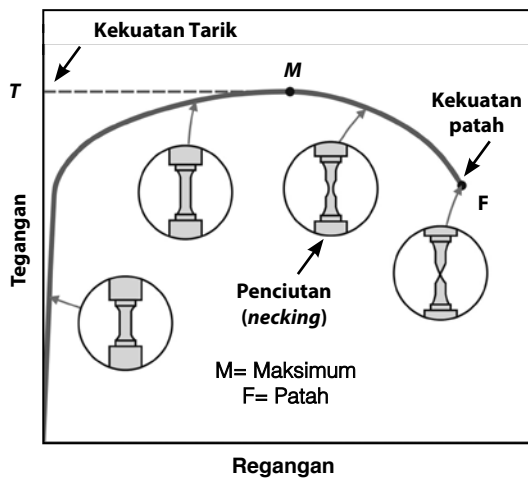
Dalam kasus seperti ini, sebuah konvensi diberlakukan, di mana ditarik sebuah garis lurus yang sejajar dengan bagian elastis dari kurva pada posisi regangan sebesar 0,002 (0,2%), disebut **metode offset**. Perpotongan antara garis lurus ini dan grafik tegangan regangan kemudian dihubungkan dengan sumbu tegangan sehingga diperoleh **tegangan luluh** (*yield strength*, σ_y)—lihat Gambar 3.8a. Jadi, tegangan luluh didefinisikan sebagai tegangan di mana deformasi plastis mulai atau ketika fenomena luluh terjadi.



GAMBAR 3.11 Ilustrasi atomik pada saat deformasi plastis terjadi.



GAMBAR 3.12 Fenomena titik luluh pada baja karbon rendah.



GAMBAR 3.13 Fenomena penciutan dan patah pada pengujian tarik.

Satuan dari tegangan luluh adalah MPa. Tegangan luluh yang diambil dengan menarik garis lurus pada deformasi 0,002 sering disebut sebagai **proof stress**, yaitu tegangan yang menyebabkan regangan sebesar 0,002.

Pada beberapa jenis baja (terutama baja karbon rendah), transisi dari deformasi elastis ke plastis terlihat sangat jelas dan sering disebut sebagai **fenomena titik luluh**, lihat Gambar 3.12, yang terdiri dari atas **titik luluh atas (upper yield point)** dan **titik luluh bawah (lower yield point)**. Untuk logam yang menunjukkan fenomena ini, tegangan luluh adalah rata-rata dari titik luluh atas dan titik luluh bawah. Jadi, tidak perlu melakukan metode offset untuk material seperti ini. Kekuatan luluh dapat bervariasi dari 35 MPa untuk aluminium, hingga lebih dari 1.400 MPa untuk baja.

Setelah meluluh, apabila pembebanan dilanjutkan maka grafik akan mencapai titik maksimum M pada Gambar 3.13 dan kemudian turun ke titik patah, F. **Kekuatan tarik (tensile strength)** adalah tegangan maksimum pada kurva tegangan-regangan, di mana merupakan tegangan maksimum yang dapat diterima material sebelum patah. Deformasi hingga titik M ini berlangsung secara seragam pada seluruh bagian spesimen.

Namun demikian, pada titik maksimum, mulai terbentuk **leher (neck)** yang merupakan daerah deformasi terlokalisasi. Fenomena ini disebut **penciutan (necking)** dan patah akan terjadi pada titik ini. Tegangan pada saat patah disebut **kekuatan patah (fracture strength)**.

Kekuatan tarik bervariasi dari 50 MPa untuk aluminium, hingga 3.000 MPa untuk baja berkekuatan tinggi. Untuk keperluan desain struktur atau desain mesin, kekuatan yang dipakai umumnya adalah kekuatan luluh. Bila (parameter) yang digunakan adalah kekuatan tarik, material sudah mengalami perubahan bentuk (bengkok, melendut) pada kondisi itu. Umumnya, kekuatan patah tidak pernah dipakai untuk keperluan desain. Sifat mekanik lainnya yang juga penting adalah keuletan (**ductility**). **Keuletan** adalah besar deformasi plastis yang dapat dicapai hingga saat patah, dinyatakan sebagai berikut.

$$\% \text{ perpanjangan} = \frac{(l_f - l_0)}{l_0} \times 100 \quad (3.5)$$

Dimana l_0 = panjang awal, l_f = panjang akhir

Selain itu, keuletan juga dapat dinyatakan sebagai persentase pengurangan penampang.

$$\% \text{ pengurangan penampang} = \frac{(A_f - A_0)}{A_0} \times 100 \quad (3.6)$$

dimana A_0 = luas penampang awal, A_f = luas penampang akhir

Material yang mengalami deformasi yang sangat kecil atau bahkan tidak mengalami deformasi plastis sama sekali, disebut sebagai material yang **rapuh (brittle)**. Sebaliknya, material yang memiliki keuletan besar disebut material yang **ulet (ductile)**. Keuletan merupakan sifat material yang penting karena (1) menunjukkan seberapa besar sebuah struktur dapat mengalami deformasi sebelum putus dan (2) menunjukkan seberapa besar derajat deformasi dapat diberikan pada sebuah material selama proses fabrikasi. Umumnya, material tergolong sebagai material yang rapuh jika memiliki keuletan kurang dari 5%

Dengan demikian, beberapa sifat mekanik material yang penting dapat diketahui melalui uji tarik. Tabel 3.2 menampilkan sifat mekanik dari beberapa material.

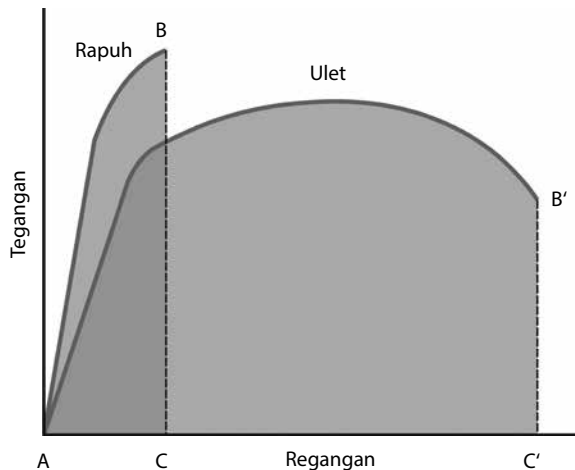
Sifat mekanik lain yang dapat diketahui dari uji tarik adalah **ketangguhan (toughness)**. Ketangguhan adalah kemampuan material menyerap energi hingga patah. Material disebut tangguh jika memiliki kekuatan dan keuletan yang tinggi. Pada kondisi pembebanan statis, ketangguhan dapat diketahui dengan mengukur luas daerah di bawah kurva tegangan-regangan. Gambar 3.14 menunjukkan bahwa material B' lebih tangguh daripada material B karena dapat menyerap energi lebih banyak sebelum patah, yang ditandai dengan besarnya luas daerah di bawah kurva tegangan-regangan. Oleh karena itu, satuan untuk mengukur ketangguhan adalah Joule (satuan energi). Pada kondisi pembebanan dinamis, ketangguhan diukur dengan pengujian impak, yang akan dibahas pada subbab 3.6 (Pengujian Impak).

Permukaan patahan uji tarik juga dapat mengindikasikan sifat ketangguhan material. Ada dua jenis patahan seperti tampak pada Gambar 3.15. Patahan ulet menunjukkan deformasi yang signifikan dengan terbentuknya mangkok (*cup*) di satu sisi dan kerucut (*cone*) di sisi lainnya. Sementara pada patahan getas, permukaan patahan rata dan cenderung memantulkan cahaya.

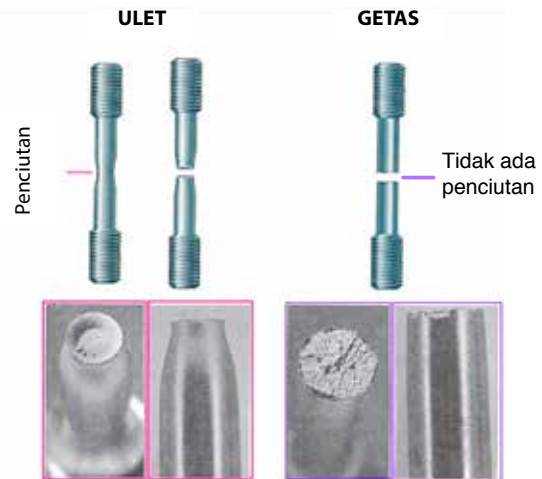
TABEL 3.2 Sifat mekanik dari beberapa material.

Logam Paduan	Kekuatan Luluh MPa (ksi)	Kekuatan Tarik MPa (ksi)	Keuletan (%) [dalam 50 mm (2 inci)]
Aluminium	35 (5)	90 (13)	40
Tembaga	69 (10)	200 (29)	45
Kuningan (70Cu-30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Besin	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: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.



GAMBAR 3.14 Representasi ketangguhan material, yang diukur dari luas daerah di bawah kurva.



GAMBAR 3.15 Permukaan patahan ulet dan getas.

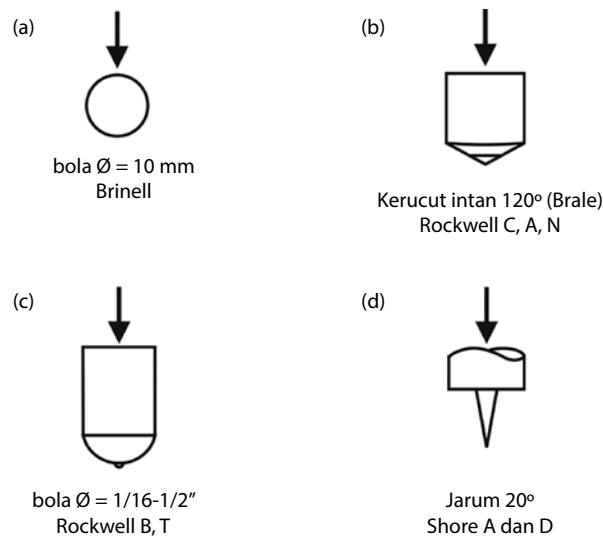
3.5 Pengujian Kekerasan

Sifat mekanik lain yang penting adalah kekerasan. **Kekerasan** merupakan ukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis terlokalisasi (contoh: "indentasi kecil" atau gores). Pengujian kekerasan yang terdahulu adalah uji kekerasan Mohs, berdasarkan skala kemampuan material untuk menggores material lain (dari 1 = talk sampai dengan 10 = intan). Kini, terdapat berbagai metode pengujian kekerasan, seperti Brinell, Vickers, dan Rockwell. Pada metode pengujian kekerasan tersebut, umumnya, digunakan *indentor* kecil (berbentuk bola atau piramid) yang ditekan ke permukaan bahan dengan mengontrol besar beban dan laju pembebanan. Indentasi (besar jejak) kemudian diukur dengan mikroskop ukur. Jenis indentor pada setiap metode pengujian kekerasan dapat dilihat pada Gambar 3.16.

Pengujian kekerasan merupakan teknik untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu material yang paling sering dilakukan. Berbagai alasannya, seperti (1) sederhana dan relatif murah; tidak memerlukan persiapan spesimen yang khusus dan alatnya relatif murah, serta (2) sifat mekanik lain—seperti kekuatan tarik—dapat diperkirakan dari nilai kekerasan.

Pengujian Kekerasan Rockwell

Metode Rockwell merupakan metode yang paling banyak digunakan dalam industri karena sangat sederhana dan tidak memerlukan keahlian khusus untuk melakukannya. Peralatan pengujian Rockwell sudah terotomasi sehingga tidak diperlukan pengukuran jejak. Nilai kekerasan langsung ditampilkan di mesin uji ketika penjejakan telah selesai dilakukan. Berbagai macam skala kekerasan Rockwell tersedia, dengan mengombinasikan bentuk indentor dan beban. Berikut adalah dua jenis *indentor Rockwell*.



GAMBAR 3.16 Bentuk indentor pada metode pengujian kekerasan, metode (a) Brinell: bola baja berdiameter 10 mm; (b) Rockwell: kerucut intan (120°); (c) Rockwell: bola baja (1/16 hingga 1/2 inci); dan (d) Shore: jarum bersudut 20°.

1. Intan berbentuk kerucut dengan sudut 120° (dikenal dengan *indentor* Brale). Intan digunakan untuk menguji material yang keras (> 100 HRB dan > 83,1 HR30T).
2. Bola baja yang dikeraskan dengan diameter 1/16, 1/8, 1/4, dan 1/2 inci. Jenis *indentor* ini digunakan untuk menguji material yang lunak.

Ada dua jenis pengujian kekerasan Rockwell, antara lain sebagai berikut.

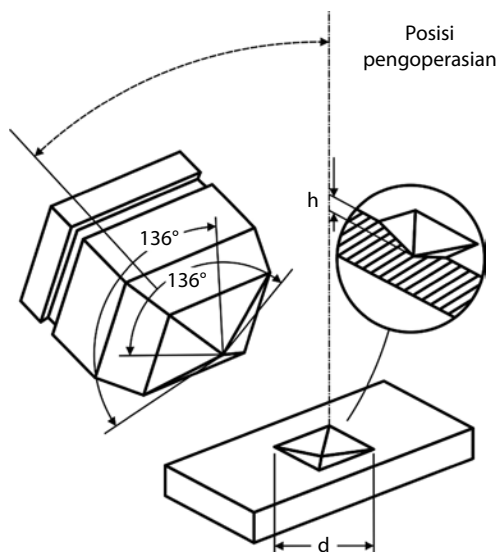
1. Rockwell; jenis pengujian yang menggunakan beban minor 10 kgf, dan beban mayor 60, 100, atau 150 kgf.
2. Superficial Rockwell; jenis pengujian yang menggunakan beban minor 3 kgf, dan beban mayor 15, 30, atau 45 kgf.

Pengujian Kekerasan Brinell

Pengujian kekerasan Brinell adalah dengan memberikan beban konstan, umumnya antara 500 dan 3.000 kgf, dengan *indentor* baja yang dikeraskan berdiameter 5 atau 10 mm, pada permukaan spesimen yang rata. Jejak diukur menggunakan mikroskop dan dikonversi ke dalam persamaan:

$$\text{BHN} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \left(D^2 - d^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)} \quad (3.7)$$

dimana P = beban (kgf), D = diameter bola indentor (mm), dan d = diameter jejak (mm). Diameter indentasi diukur dengan mikroskop berskala 0,05 mm (0,002 inci). Mikroskop harus memiliki skala dan penerangan yang cukup agar mudah dalam pembacaan.



GAMBAR 3.17 Indentor piramid intan pada metode Vickers.

Pengujian Kekerasan Vickers

Metode uji kekerasan lain harus digunakan untuk material dengan kekerasan tinggi yang tidak dapat diukur dengan metode Brinell (maks. 450 HRB [48 HRC]), yaitu metode Vickers. *Indentor*-nya adalah piramid intan yang memiliki dasar berbentuk kotak dengan beban 1–120 kgf (lihat Gambar 3.17). Beban diberikan selama 10–15 detik dan jejak berbentuk intan yang diukur kedua diameternya dalam mm. Nilai kekerasan Vickers dihitung menggunakan persamaan berikut

$$HV = \frac{[2P \sin (136^\circ / 2)]}{d^2} \quad (3.8)$$

$$HV = \frac{1,8544P}{d^2} \quad (3.9)$$

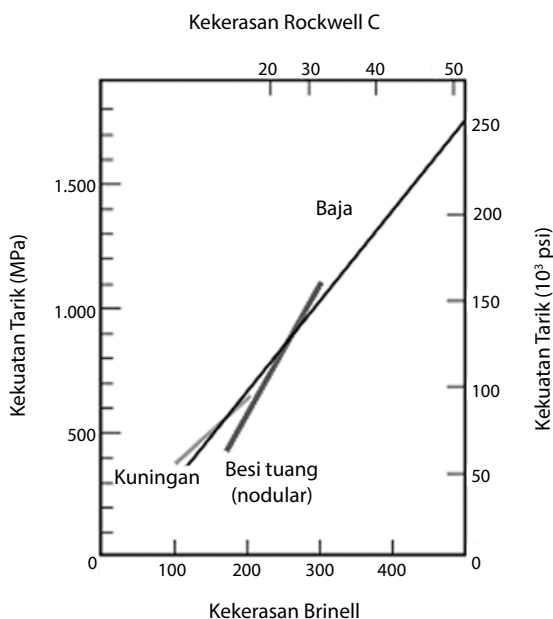
dimana P = beban indentasi (kgf) dan d = rata-rata diameter jejak (mm). Nilai kekerasan Vickers dinyatakan dalam nomor Vickers dengan simbol "HV" diikuti dengan sufiks yang menyatakan beban. Perhatikan contoh berikut.

1. 440 HV₃₀; artinya, 440 Vickers dengan beban 30 kgf yang diaplikasikan dalam waktu 10–15 detik.
2. 440 HV_{30/20}; artinya, 440 Vickers dengan beban 30 kgf yang diaplikasikan dalam waktu 20 detik.

Korelasi antara Kekerasan dan Kekuatan

Kekuatan tarik dan kekerasan sama-sama merupakan ketahanan material terhadap deformasi plastis. Keduanya berbanding lurus, tetapi konstanta proporsionalitasnya berbeda untuk jenis material yang berbeda (lihat Gambar 3.18). Pada beberapa material, korelasi antara kekerasan dan kekuatan dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\text{Kekuatan Tarik (MPa)} = 3,45 \times \text{BHN} \quad (3.10)$$



GAMBAR 3.18 Korelasi antara kekuatan tarik dan kekerasan (Brinell) dari material kuningan, baja dan besi tuang nodular.

Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

3.6 Pengujian Impak

Beban impact (beban kejut) adalah beban yang diberikan secara cepat dan tiba-tiba. Oleh karena itu, kecepatan dan energi kinetik dari benda yang memukul (memberikan pukulan) diubah dan diteruskan ke benda yang menerima pukulan. Banyak komponen struktur yang harus tahan pada kecepatan pembebanan yang tinggi dalam pemakaiannya.

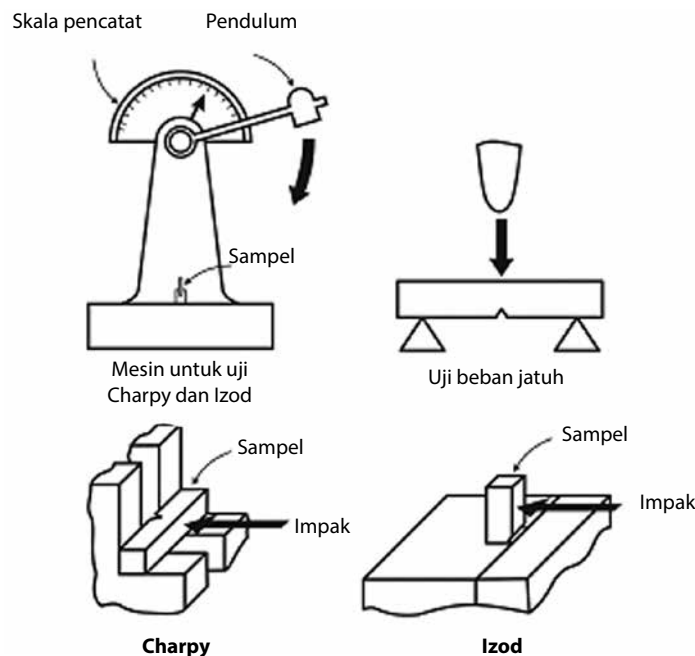
Apakah perbedaan pembebanan pada pengujian tarik dan pengujian impact? Pada pengujian tarik, beban bertambah dengan kecepatan tetap dan secara perlahan-lahan (1 m/menit) sehingga biasa disebut sebagai pengujian statis atau monotonik. Pada pengujian impact, beban diberikan dengan kecepatan tinggi (5 m/detik), yang mana disebut juga sebagai pembebanan dinamis.

Berikut adalah dua jenis pengujian impact.

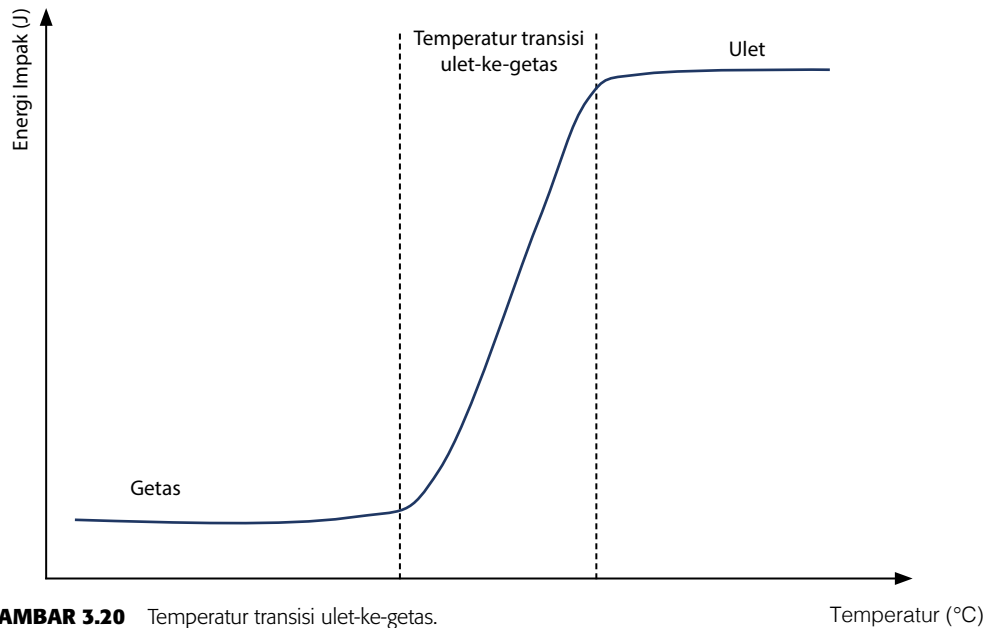
1. Pengujian impact Charpy
2. Pengujian impact Izod

Kedua pengujian impact tersebut menggunakan tipe pendulum, dengan pukulan tunggal yang sama, serta perbedaan utama pada spesimen dan dimensi spesimen (lihat Gambar 3.19). Pengujian Charpy memakai tiga titik tumpu beban, di mana kedua ujung spesimen ditahan. Pengujian Izod dibuat seperti batang cantilever dengan pendulum yang jatuh memukul spesimen di atas takik. Pengujian Charpy lebih banyak digunakan dalam industri sebagai pengujian impact.

Energi impact (E) adalah jumlah energi yang diserap oleh material ketika menerima beban impact yang diberikan oleh pendulum, disebut juga sebagai ketangguhan takik. Sementara itu, harga



GAMBAR 3.19 Skema pengujian impact Charpy dan Izod.



GAMBAR 3.20 Temperatur transisi ulet-ke-getas.

impak (HI) didefinisikan sebagai besar energi yang diserap (E) dibagi dengan luas penampang di bawah takik (A). Energi impak dinyatakan dalam satuan J/mm^2 sesuai dengan persamaan berikut.

$$HI = \frac{E}{A} \quad (3.11)$$

Salah satu fungsi pengujian impak adalah untuk menentukan **Temperatur Transisi Ulet-ke-Getas**, akibat penurunan temperatur. Temperatur transisi ini dapat diperoleh dengan melakukan pengujian impak pada beberapa temperatur yang berbeda (lihat Gambar 3.20). Pada temperatur yang sangat rendah, logam cenderung menjadi getas dan tidak dapat menyerap energi impak yang diterimanya. Sebagai contoh, temperatur transisi merupakan fenomena yang menyebabkan Kapal Titanic tenggelam setelah menabrak gunung es. Bahan lambung kapal menjadi sangat getas pada temperatur dingin di Samudera Atlantik. Ketika menabrak gunung es, lambung kapal pecah, kapal bocor, dan akhirnya tenggelam. Penelitian terus dilakukan untuk menurunkan temperatur transisi ini menjadi sangat rendah (di daerah kriogenik) sehingga aman digunakan pada temperatur musim dingin.

3.7 Sifat Fisik Material

Sifat fisik material adalah perilaku material sebagai respons terhadap beban fisik, seperti cahaya, listrik, magnet, termal (panas), dan lain-lain. Berat jenis juga termasuk salah satu sifat fisik material. **Berat jenis** (ρ) didefinisikan sebagai massa (m) per satuan volume (V)—dengan satuan kg/m^3 . Perhatikan persamaan berikut.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.12)$$

Sifat Termal

Umumnya material dapat berada dalam tiga fasa, yaitu padat, cair, dan gas. Sifat termal antara lain adalah temperatur perubahan fasa, seperti **temperatur lebur** (°C atau K), yaitu temperatur di mana terjadi perubahan fasa dari padat menjadi cair. **Temperatur didih** (°C atau K), yaitu temperatur di mana terjadi perubahan fasa dari cair ke gas.

Ketika material dipanaskan, material umumnya akan memuai. **Koefisien ekspansi termal linear (α_L)** adalah perubahan panjang material akibat perubahan temperatur.

$$\alpha_L = \frac{\Delta l}{l \times \Delta t} \quad (3.13)$$

dengan l adalah panjang awal sampel; Δl adalah perubahan panjang; dan Δt adalah perubahan temperatur. Satuan α_L adalah °C⁻¹. Umumnya, koefisien ekspansi termal linear diperlukan untuk komponen yang memerlukan material sisipan (*insert*). Komponen akan dipanaskan agar memuai. Dalam kondisi memuai, material sisipan dimasukkan sehingga ketika dingin material sisipan akan pas pada posisinya.

Panas jenis adalah energi panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur dari sebuah satuan massa material sebesar 1 derajat. Untuk mengukurnya, pemanasan pada material dengan berat tertentu dilakukan, sesuai persamaan:

$$H = CW(T_2 - T_1) \quad (3.14)$$

dengan H adalah jumlah energi panas (Joule); C adalah panas jenis material tersebut (Joule/kg K), W = berat material (kg), dan $(T_2 - T_1)$ adalah perubahan temperatur (K).

Konduksi panas adalah perpindahan energi panas dalam sebuah material dari molekul ke molekul atau dari atom ke atom—semata-mata karena gerakan termal dan tanpa terjadinya perpindahan massa. Dengan demikian, sifat **konduktivitas panas** adalah kemampuan material melakukan perpindahan panas dalam dirinya sendiri, yang diukur oleh **koefisien konduktivitas termal**, dengan satuan J /s. mm.°C. Koefisien konduktivitas termal umumnya tinggi pada logam serta rendah pada keramik dan plastik.

Sifat Listrik

Material memiliki kemampuan yang berbeda-beda dalam meneruskan listrik. Listrik dialirkan melalui pergerakan pembawa muatan—merupakan partikel kecil yang memiliki muatan listrik. Pada material padat, pembawa muatan adalah elektron, sedangkan ion negatif dan ion positif adalah pembawa muatan pada cairan. Pergerakan pembawa muatan didorong oleh tegangan listrik dan dihambat oleh karakteristik inheren material, seperti struktur atom dan ikatan antar-atom atau antar molekul, yang dikenal sebagai Hukum Ohm:

$$I = \frac{E}{R} \quad (3.15)$$

dimana I = aliran listrik (Ampere, A); E = tegangan listrik (V); dan R = tahanan/resistansi listrik (Ω /ohm). Resistansi dalam sebuah potongan material yang seragam (misalnya, kawat) bergantung pada panjang (L), luas penampang (A), dan resistivitas material (r).

$$R = r \frac{L}{A} \quad (3.16)$$

Satuan resistivitas (r) adalah Ωm . **Resistivitas** didefinisikan sebagai kemampuan material untuk menahan aliran listrik. Resistivitas bukanlah konstanta, namun bervariasi dengan perubahan temperatur. Pada logam, resistivitas meningkat dengan meningkatnya temperatur. Terkadang, lebih mudah untuk memahami bahwa material dapat mengalirkan listrik daripada menahan aliran listrik. Hal ini disebut sebagai konduktivitas, yang merupakan kebalikan dari resistivitas.

TABEL 3.3 Konduktivitas listrik beberapa material. Perhatikan perbedaan nilai yang signifikan antara logam yang merupakan material konduktor dan nonlogam yang merupakan material isolator.

$$\text{Konduktivitas} = \frac{1}{r} \quad (3.17)$$

Material	Konduktivitas Listrik [(Ωm) ⁻¹]
Logam	
Perak	$6,8 \times 10^7$
Tembaga	$6,8 \times 10^7$
Emas	$4,3 \times 10^7$
Aluminium	$3,8 \times 10^7$
Kuningan (70Cu-30Zn)	$1,6 \times 10^7$
Besi	$1,0 \times 10^7$
Platina	$0,94 \times 10^7$
Baja karbon	$0,6 \times 10^7$
Baja tahan karat	$0,2 \times 10^7$
Grafit	
Grafit	$3 \times 10^4 - 2 \times 10^5$
Keramik	
Beton kering	10^{-9}
Gelas soda-lime (limun soda)	$10^{-10} - 10^{-11}$
Porselen	$10^{-10} - 10^{-12}$
Gelas borosilikat (Pyrex)	$\sim 10^{-13}$
Aluminium oksida	$< 10^{-13}$
Fused silica	$< 10^{-18}$
Polimer	
Fenol formadehida	$10^{-9} - 10^{-10}$
Poli (metil-metakrilat)	$< 10^{-12}$
Nilon 6,6	$10^{-12} - 10^{-13}$
Polistirena	$< 10^{-14}$
Polietilena	$10^{-15} - 10^{-17}$
Politetrafluoroetilena	$< 10^{-17}$

Satuan konduktivitas adalah (Ωm)⁻¹. Sebagian besar logam adalah **konduktor** listrik yang baik karena memiliki ikatan logam di mana elektronnya bergerak bebas membentuk awan elektron. Sementara itu, keramik dan polimer memiliki elektron yang sangat terikat dalam ikatan kovalen atau ikatan ionik sehingga merupakan konduktor listrik yang buruk dan sering dipakai sebagai **isolator**. Konduktivitas listrik beberapa logam dapat dilihat pada Tabel 3.3. Material yang resistivitasnya berada di antara isolator dan konduktor disebut semikonduktor. Material semikonduktor yang umum dipakai adalah silikon karena sangat banyak ditemukan di alam, serta harganya murah dan mudah diproses. Semikonduktor sangat unik karena kemampuannya untuk mengubah konduktivitas di permukaan pada daerah yang sangat terbatas. Hal ini dimanfaatkan untuk membuat sirkuit terintegrasi (*integrated circuit*—IC).

Sifat Magnet

Medan magnet adalah gaya yang dihasilkan dari perubahan energi pada sebuah ruang. Medan magnet dihasilkan oleh muatan listrik yang bergerak,

Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

misalnya aliran listrik dalam sebuah konduktor, gerakan orbital, dan spin elektron. Medan magnet dapat digambarkan sebagai garis imajiner pada sebuah magnet atau lingkaran arus seperti tampak pada Gambar 3.21.

Jika sebuah **medan magnet H** , dihasilkan oleh gulungan *cylindrical* (atau solenoid) dengan N gulungan dan panjang l , serta membawa arus sebesar I maka:

$$H = \frac{NI}{l} \quad (3.18)$$

Diagram skematis dapat dilihat pada Gambar 3.22a. Medan magnet H adalah seperti yang dihasilkan oleh lingkaran arus atau magnet batang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.21. Satuan dari medan magnet (H) adalah Ampere/m.

Induksi magnetik atau densitas fluks magnetik B , adalah besar kekuatan medan dalam sebuah material yang berada dalam medan magnet H . Satuan dari B adalah Tesla atau Weber/ m^2 atau Wb/m^2 . Baik B maupun H , keduanya adalah vektor bidang, yang bukan hanya memiliki besar, tetapi juga memiliki arah.

Kekuatan medan magnet dan densitas fluks magnetik saling berhubungan dengan persamaan:

$$B = \mu H \quad (3.19)$$

Parameter μ disebut **permeabilitas**, yaitu sifat dari sebuah medium spesifik di mana medan magnet H lewat dan di mana densitas fluks magnetik B diukur, seperti diilustrasikan pada Gambar 3.22b. Permeabilitas μ pada dasarnya adalah ukuran sejauh mana sebuah material dapat dimagnetisasi. Satuan permeabilitas μ adalah Weber per Ampere-meter ($Wb/A.m$) atau Henries per meter (H/m). Di dalam vakum:

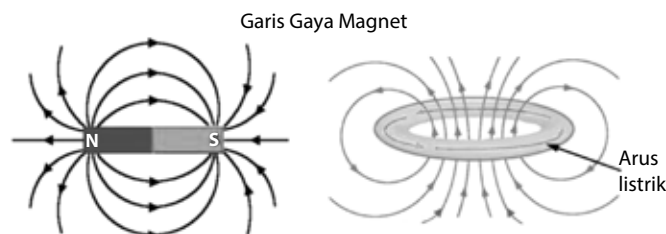
$$B_0 = \mu_0 H \quad (3.20)$$

dengan μ_0 adalah permeabilitas vakum dan merupakan konstanta. Nilai $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ($1,257 \times 10^{-6}$) H/m . Variabel B_0 adalah densitas fluks dalam vakum, seperti diilustrasikan pada Gambar 3.22a.

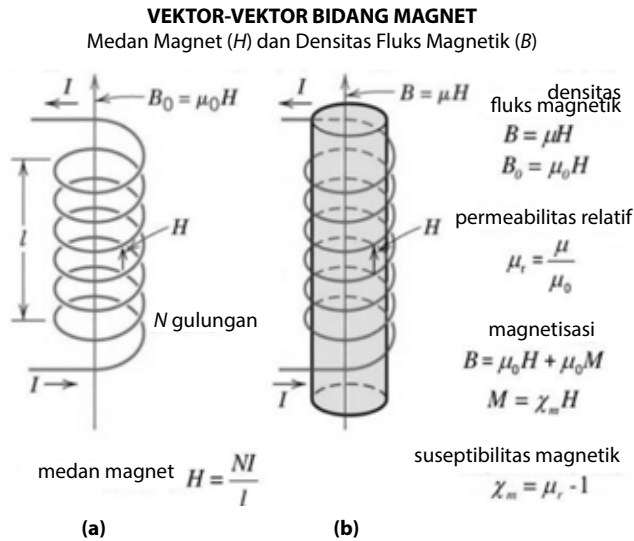
Beberapa parameter dapat digunakan untuk menjelaskan sifat magnetik sebuah padatan. Salah satunya adalah rasio antara permeabilitas sebuah material dan permeabilitas di dalam vakum atau:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.21)$$

dengan μ_r adalah **permeabilitas relatif**. Permeabilitas atau permeabilitas relatif dari sebuah material adalah ukuran sejauh mana sebuah material dapat dimagnetisasi

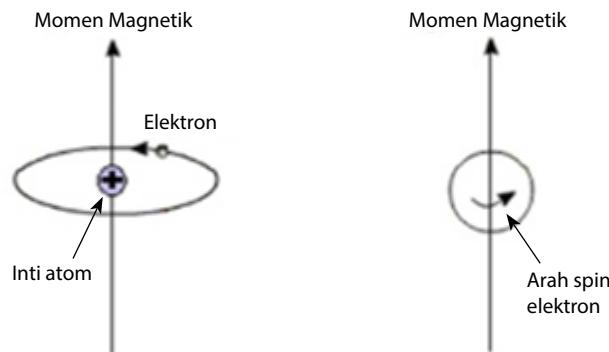


GAMBAR 3.21 Medan magnet pada sebuah magnet dan lingkaran arus.



GAMBAR 3.22 Gambar 3.22. (a) Medan magnet H yang dihasilkan oleh gulungan cylindrical (solenoid) dengan N gulungan dan panjang l , sesuai Persamaan 3.18. Densitas fluks magnetik B_0 di dalam vakum sama dengan $\mu_0 H$, di mana $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. (b) Densitas fluks magnetik B di dalam material padatan sama dengan μH , di mana μ adalah permeabilitas dari material padatan.

Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.



GAMBAR 3.23 Momen magnetik yang dihasilkan oleh (a) elektron bergerak di orbit dan (b) spin elektron.

atau kemudahan sebuah medan magnet B dapat diinduksi dengan kehadiran medan magnet eksternal H .

Besaran medan magnet lainnya, M , yaitu **magnetisasi** didefinisikan dengan persamaan:

$$B_0 = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (3.22)$$

Sebagai pembawa muatan yang bergerak, elektron menghasilkan medan magnet kecil dengan momen magnetik sejajar sumbu rotasi. Spin elektron juga menghasilkan momen magnetik sejajar sumbu spin (lihat Gambar 3.23). Magnetisme di dalam material terjadi karena penyearahan momen magnetik. Ketika medan magnet H diberikan pada sebuah material,

momen magnetik di dalam material akan cenderung menyearah sehingga meningkatkan kekuatan medan. Kontribusi peningkatan kekuatan medan ini dinyatakan dengan $\mu_0 M$ pada Persamaan 3.22.

Besar M berbanding lurus dengan medan magnet yang diberikan:

$$M = \chi_m H \quad (3.23)$$

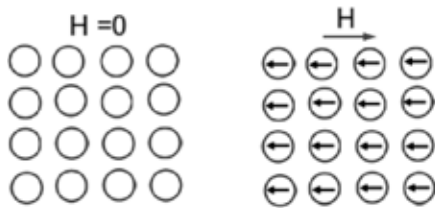
dengan χ_m disebut **suseptibilitas magnetik**, yang tidak memiliki satuan. Hubungan antara suseptibilitas magnetik dengan permeabilitas relatif adalah sebagai berikut.

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (3.24)$$

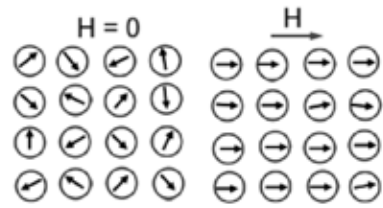
Satuan magnetik dapat menimbulkan kebingungan karena ada dua sistem satuan yang sering digunakan. Satuan yang kita bahas di atas adalah SI (meter-kilogram-second), sedangkan satuan lain adalah sistem cgs-emu (*centimeter-gram-second-electromagnetic unit*). Satuan dari kedua sistem dirangkum pada Tabel 3.4 yang disertai dengan faktor konversinya.

Berdasarkan keberadaan dan penyearahan momen magnet dengan dan tanpa adanya medan magnet, dikenal tiga jenis magnetisme, sebagai berikut.

1. **Diamagnetisme**, yaitu magnetisme lemah yang muncul hanya bila diberikan medan magnet eksternal. Diamagnetisme muncul karena perubahan gerakan orbital elektron saat medan magnet eksternal diaplikasikan (Gambar 3.24). Tidak ada kutub magnet bila medan magnet eksternal tidak ada. Ketika diberikan medan magnet, kutub magnet akan terbentuk pada arah berlawanan terhadap arah medan. Suseptibilitas magnetik adalah negatif, yaitu B dari material diamagnetik lebih rendah dari B vakum. Contoh material diamagnetik: Al_2O_3 , Cu, Au, Si, Zn.
2. **Paramagnetisme**. Dalam material paramagnetik (Gambar 3.25), pembatalan momen magnet di antara pasangan elektron tidak lengkap sehingga momen magnet masih ada walaupun tidak ada medan magnet eksternal. Namun demikian, arah momen magnet acak sehingga tidak ada magnetisasi tanpa medan magnet eksternal. Ketika diberikan medan magnet, seluruh momen magnet menyearah mengikuti arah medan. Nilai suseptibilitas magnet kecil, namun positif. Nilai B dari material paramagnet sedikit lebih besar daripada B vakum. Contoh material paramagnetik adalah Al, Cr, Mo, Ti, Zr. Nilai suseptibilitas magnetik dari beberapa material diamagnetik dan paramagnetik dapat dilihat pada Tabel 3.5
3. **Feromagnetisme**. Beberapa material memiliki momen magnet permanen walaupun tidak ada medan magnet eksternal. Hal ini disebut feromagnetisme. Momen magnet permanen dalam material feromagnetik muncul karena spin elektron yang tidak terbatalkan akibat struktur elektron aslinya. Rangkaian interaksi antara spin elektron dari atom yang bersebelahan menyebabkan masing-masing momen saling menyearahkan satu dan lainnya. Penyebab rangkaian interaksi ini adalah struktur elektron. Material feromagnetik seperti Fe (No atom 26 $-\text{[Ar]}4s^23d^6$) memiliki orbital d yang tidak lengkap sehingga terdapat spin elektron yang tidak berpasangan.



GAMBAR 3.24 Pembentukan kutub magnet pada material diamagnetik.



GAMBAR 3.25 Pembentukan kutub magnet pada material paramagnetik.

TABEL 3.4 Satuan magnetik dan faktor konversi untuk SI dan sistem cgs-emu.

Nama	Simbol	Satuan SI		Satuan cgs-emu	Konversi
		Turunan	Utama		
Induksi magnetik (densitas fluks)	B	Tesla (Wb/m ²) ^a	kg/s.C	Gauss	1 Wb/m ² = 10 ⁴ Gauss
Kekuatan medan magnet	H	Ampere/m	C/m.s	Oersted	1 Ampere/m = 4 π \times 10 ⁻³ Oersted
Magnetisasi	M (SI) I (cgs-emu)	Ampere/m	C/m.s	Maxwell/cm ²	1 Ampere/m = 10 ⁻³ Maxwell/cm ²
Permeabilitas vakum	μ_0	Henry/m ^b	kg.m/C ²	Tanpa satuan (emu)	4 π \times 10 ⁻⁷ Henry/m = 1 emu
Permeabilitas relatif	μ_r (SI) μ' (cgs-emu)	Tanpa satuan	Tanpa satuan	Tanpa satuan	$\mu_r = \mu'$
Suseptibilitas	χ_m (SI) χ'_m (cgs-emu)	Tanpa satuan	Tanpa satuan	Tanpa satuan	$\chi_m = 4\pi \chi'_m$

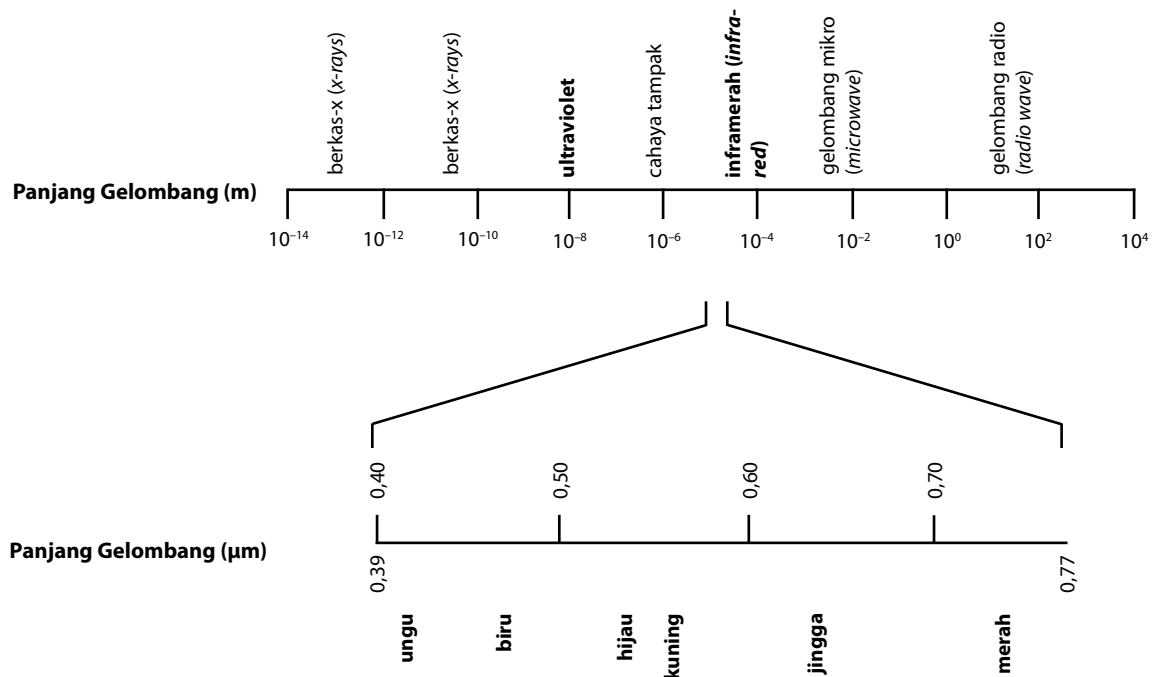
Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

TABEL 3.5 Suseptibilitas magnetik temperatur kamar dari material diamagnetik dan paramagnetik.

Diamagnetik		Paramagnetik	
Material	Suseptibilitas χ_m (volume) (satuan SI)	Material	Suseptibilitas χ_m (volume) (satuan SI)
Aluminium oksida	-1,81 \times 10 ⁻⁵	Aluminium	2,07 \times 10 ⁻⁵
Tembaga	-0,96 \times 10 ⁻⁵	Kromium	3,13 \times 10 ⁻⁵
Emas	-3,44 \times 10 ⁻⁵	Kromium klorida	1,51 \times 10 ⁻⁵
Air raksa	-2,85 \times 10 ⁻⁵	Mangan Sulfat	3,70 \times 10 ⁻⁵
Silikon	-0,41 \times 10 ⁻⁵	Molibdenum	1,19 \times 10 ⁻⁵
Perak	-2,38 \times 10 ⁻⁵	Natrium	8,48 \times 10 ⁻⁵
Natrium klorida	-1,41 \times 10 ⁻⁵	Titanium	1,81 \times 10 ⁻⁵
Seng	-1,56 \times 10 ⁻⁵	Zirkonium	1,09 \times 10 ⁻⁵

Sifat Optik

Sifat optik adalah perilaku material sebagai respons terhadap interaksi dengan radiasi elektromagnetik pada gelombang cahaya tampak. Spektrum radiasi elektromagnetik (Gambar 3.26) bervariasi mulai gelombang γ dengan panjang gelombang $\sim 10^{-12}$ m hingga berkas-x (x-rays), ultraviolet, cahaya tampak, sinar inframerah (*infrared*), dan gelombang radio dengan panjang gelombang 10⁵ m. Cahaya tampak memiliki panjang gelombang 0,39–0,77 μ m. Cahaya dapat dianggap sebagai gelombang dan memiliki partikel yang disebut foton.



GAMBAR 3.26 Spektrum radiasi elektromagnetik dan panjang gelombangnya.

Material diklasifikasikan berdasarkan interaksinya dengan cahaya tampak ke dalam tiga kelompok, sebagai berikut.

1. Material yang mampu meneruskan cahaya dengan hanya sedikit penyerapan dan pemantulan disebut material **transparan**. Kita dapat melihat melaluinya.
2. Material **transluscent** adalah material yang meneruskan cahaya secara buram (*diffused*). Objek tidak dapat dilihat dengan jelas melalui material ini.
3. Material yang tidak dapat meneruskan cahaya disebut material **tidak tembus pandang** (*opaque*). Material ini menyerap seluruh energi dari foton cahaya.

3.8 Sifat Kimia Material

Penting untuk mengetahui sifat kimia material karena sebagian besar material bersentuhan dengan material lain dan dapat bereaksi kimia. Karena reaksi kimia ini, material dapat mengalami penurunan sifat atau kerusakan. Salah satu sifat kimia yang penting adalah komposisi kimia. **Komposisi kimia** dari sebuah material mengindikasikan unsur yang berkombinasi membentuk material tersebut. Komposisi kimia sangat memengaruhi sifat material. Kekuatan, kekerasan, keuletan, kerapuhan, ketahanan korosi, kemampuan, dan sebagainya, bergantung pada komposisi kimia material. Oleh karena itu, kita harus mengetahui komposisi dari material.

TABEL 3.6 Komposisi kimia beberapa material.

Material	Komposisi Kimia
Baja tahan karat	Fe, Cr: 10–27%, Ni: 6–22%
Kuningan	Cu: 60–90%, Zn: 10–40%
Perunggu	Cu: 60–90%, Sn: 10–40%
Inconel	Ni: 40–80%, Cr: 14–30%, Fe: 1–11%
Duralumin	Al: 96%, Cu: 4%
Nitinol	Ni: 50%, Ti: 50%
Kupronikel	Cu: 70–90%, Ni: 10–30%

**GAMBAR 3.27** Baja terkorosi sehingga terjadi kehilangan material.

Contoh komposisi kimia dari beberapa material ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Korosi adalah serangan merusak dan tidak sengaja pada logam karena adanya reaksi elektrokimia dan biasanya berawal dari permukaan (lihat Gambar 3.27). **Reaksi elektrokimia** adalah reaksi kimia yang melibatkan perpindahan elektron dari sebuah spesies kimia ke spesies lainnya. Atom logam umumnya mudah melepas elektron, atau yang sering disebut sebagai **reaksi oksidasi**. Contoh: Logam M yang memiliki n elektron valensi akan mengalami reaksi oksidasi sebagai berikut.



di mana M menjadi ion bermuatan positif n^{+} dan kehilangan sejumlah n elektron valensi, yang disimbolkan sebagai e^{-} . Contoh logam yang teroksidasi adalah



Tempat terjadinya oksidasi disebut **anoda**, sedangkan reaksi oksidasi sering disebut reaksi anodik.

Elektron yang dihasilkan dari setiap atom logam yang teroksidasi harus dipindahkan dan menjadi bagian dari spesies kimia lain, yang dikenal dengan **reaksi reduksi**. Contohnya, logam yang mengalami korosi di dalam larutan asam yang memiliki konsentrasi ion hidrogen (H^{+}) tinggi maka ion H^{+} akan direduksi, dan dihasilkanlah gas hidrogen (H_2).



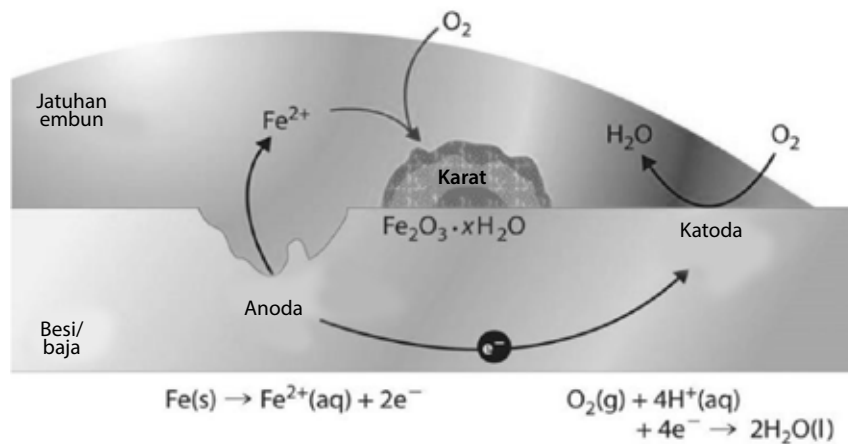
Reaksi reduksi lainnya juga dimungkinkan, yang bergantung pada jenis larutan di mana logam terekspos. Untuk larutan asam yang memiliki oksigen terlarut, reaksi reduksinya adalah



Atau, apabila larutan cair dasar atau netral mengandung oksigen terlarut maka reaksinya adalah:



Ion logam yang ada di dalam larutan juga dapat direduksi. Untuk ion yang memiliki lebih dari satu valensi (ion multivalensi), reduksi dapat terjadi melalui reaksi:



GAMBAR 3.28 Reaksi oksidasi-reduksi pada proses korosi.

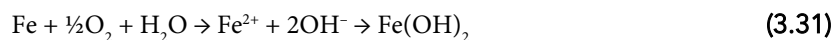


di mana ion logam menurunkan jumlah valensinya dengan menerima elektron. Atau, sebuah logam dapat direduksi total dari sebuah ionik menjadi sebuah logam netral sesuai reaksi:

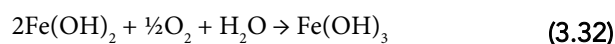


Lokasi dimana terjadi reaksi reduksi disebut **katoda**. Dua atau lebih reaksi reduksi dapat terjadi bersamaan. Keseluruhan reaksi elektrokimia harus terdiri atas minimal sebuah reaksi oksidasi dan sebuah reaksi reduksi yang dijumlahkan. Oleh karena itu, reaksi oksidasi saja atau reaksi reduksi saja sering disebut **reaksi setengah**. Tidak ada akumulasi muatan dari elektron dan ion karena seluruh elektron yang dihasilkan dari reaksi oksidasi harus dihabiskan oleh reaksi reduksi.

Contoh reaksi oksidasi atau korosi pada besi di dalam air yang mengandung oksigen terlarut (Gambar 3.28). Reaksi ini terjadi dalam dua tahap. Tahap pertama adalah Fe dioksidasi menjadi Fe^{2+} [sebagai Fe(OH)_2]:



kemudian pada tahap kedua menjadi Fe^{3+} [sebagai Fe(OH)_3] sesuai reaksi:



Senyawa Fe(OH)_3 adalah yang dikenal sebagai karat. Sebagai konsekuensi dari oksidasi, ion logam akan masuk ke larutan sebagai ion atau dapat menjadi senyawa tidak larut bersama unsur nonlogam seperti pada Reaksi/Persamaan (3.32). Laju korosi adalah laju penghilangan material akibat



GAMBAR 3.29 Kupon sampel uji laju korosi.

reaksi kimia, dinyatakan dalam **laju penetrasi korosi (corrosion penetration rate—CPR)**, sesuai persamaan berikut.

$$CPR = KW / \rho At \quad (3.33)$$

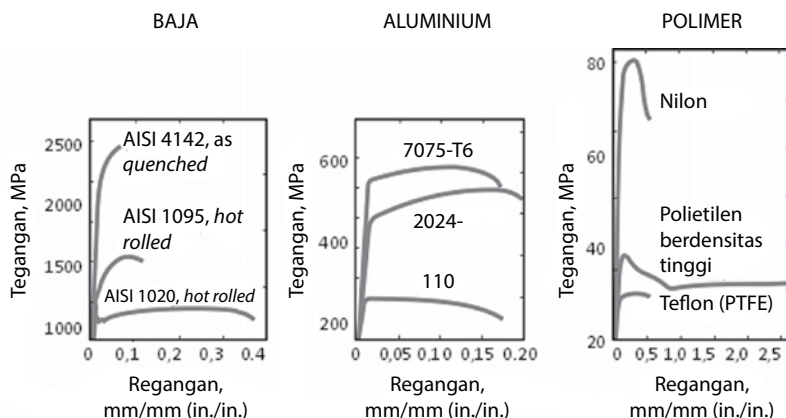
dengan W = berat yang hilang setelah waktu terpapar (t); ρ adalah berat jenis material; A = luas daerah spesimen yang terpapar; dan K adalah konstanta. Satuan CPR adalah mpy (mils per year, di mana 1 mil = 0,001 inci) atau mm/tahun. Bentuk spesimen dapat dilihat pada Gambar 3.29.

Latihan

- Sebuah batangan silinder dengan panjang 100 mm dan diameter 10,0 mm akan dideformasi dengan beban tarik sebesar 27.500 N. Desain tidak memperkenankan batangan berdeformasi plastis dan mengalami pengurangan diameter penampang lebih dari $7,5 \times 10^{-3}$ mm. Pilihlah material pada tabel yang dapat memenuhi kriteria desain tersebut. Perhitungan sebagai penyesuaian/justifikasi pemilihan material harus dituliskan.

Material	Modulus Elastisitas (GPa)	Kekuatan Luluh (MPa)	Rasio Poisson
Paduan aluminium	70	200	0,33
Paduan kuningan	101	300	0,35
Paduan baja	207	400	0,27
Paduan titanium	107	650	0,36

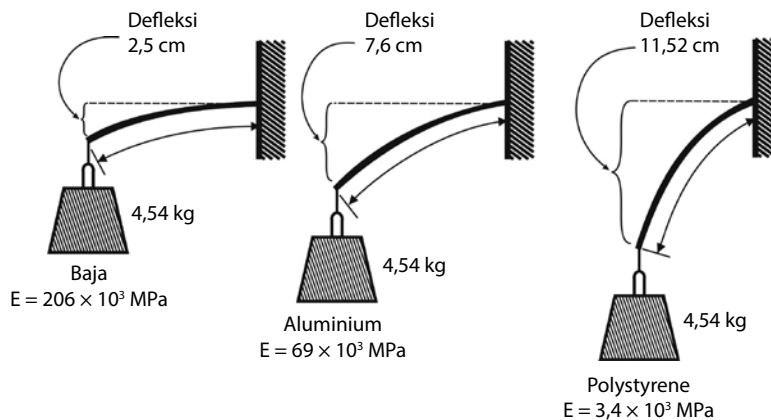
- Perhatikan setiap kelompok material pada gambar berikut ini.



Tentukan:

- Material yang paling kuat.
- Material yang paling lemah/lunak.
- Material yang paling kaku.

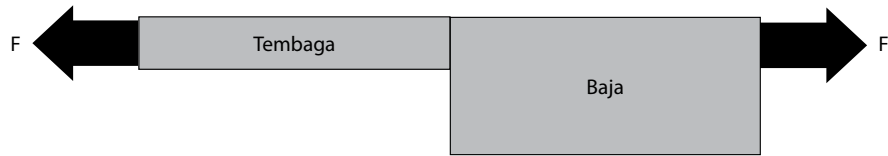
- d. Material dengan kekuatan luluh paling tinggi.
 - e. Material dengan elongasi paling besar.
 - f. Material yang paling ulet.
 - g. Material yang paling tangguh.
3. Gambar berikut menunjukkan defleksi dari tiga jenis material (baja, aluminium, dan polystyrene) akibat pembebanan sebesar 4,54 kg. Dari gambar tersebut, tentukan jenis material yang paling kaku.



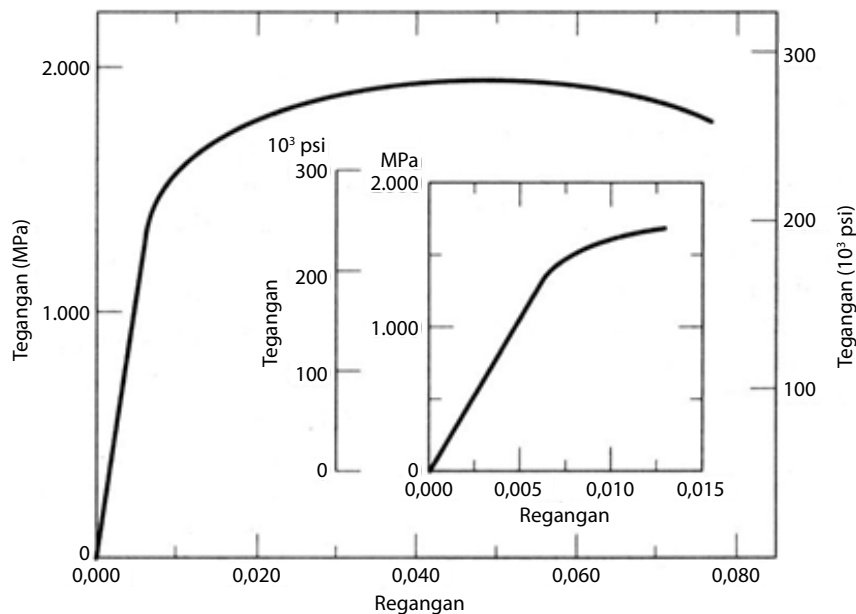
4. Bagaimana cara untuk mengetahui/mengukur ketangguhan suatu material berdasarkan grafik tegangan-regangan (hasil uji tarik)? Jelaskan.
5. Tabel berikut ini merupakan data modulus elastisitas dari beberapa material, namun beberapa data di antaranya tidak ada. Menggunakan hanya informasi dari tabel, perkirakan berapa nilai modulus elastisitas yang masih kosong. Beri alasan terhadap perkiraan jawaban Anda. Alasan anda adalah bagian terpenting dari jawaban.

Material	Modulus Elastisitas (GPa)	Material	Modulus Elastisitas (GPa)
Al (aluminium)	*	BeO (berilia)	380
Fe (besi murni)	200	ZrO (zirkonia)	240
Baja	*	Polietilen, densitas tinggi	0,7
Paduan Al (1% Mn)	69	Polistirena	*
Paduan super berbasis Fe	*	Polikarbonat	2,6
Al_2O_3 (alumina)	*	Polipropilena	*

6. Dua batang logam disambungkan menjadi satu kesatuan seperti tampak pada gambar di bawah. Batang pertama terbuat dari tembaga dengan kekuatan luluh 350 MPa dan berdiameter 10 mm. Batang kedua terbuat dari baja dengan kekuatan luluh 200 MPa dan berdiameter 20 mm. Beban sebesar 30 kN diberikan kepada struktur batang tersebut. Jelaskan material mana yang akan berdeformasi terlebih dulu. Dukung jawaban Anda dengan menggunakan perhitungan.



7. Sebuah spesimen silinder dari sebuah logam diberi beban tekan. Jika diameter awal dan akhirnya masing-masing adalah 30,00 dan 30,04 mm, serta panjang akhirnya adalah 105,20 mm maka hitung panjang awalnya bila deformasi seluruhnya elastis. Modulus elastis dan modulus geser dari logam ini masing-masing adalah 65,5 dan 25,4 GPa.
8. Sebuah spesimen baja memiliki kekerasan 300 BHN. Berapakah diameter indentasinya apabila digunakan beban sebesar 500 kg.
9. Sebuah batangan baja mengalami beban tarik. Kurva tegangan-regangannya seperti tampak pada gambar di bawah.



Sumber: Diadaptasi dari William D. Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Edisi ke-8 (John Wiley & Sons, Inc.: 2010).

- a. Tentukan modulus elastisitas dari baja tersebut.
- b. Tentukan keuletan dari baja tersebut.
- c. Tentukan kekuatan tarik dari baja tersebut.
- d. Sebuah kawat terbuat dari baja tersebut dengan panjang 120 mm dan diameter 15mm. Kawat didesain untuk menerima beban tarik sebesar 300.000 N tanpa boleh mengalami deformasi plastis. Apakah baja tersebut dapat memenuhi persyaratan tersebut? Jelaskan jawaban Anda.

10. Indentor kekerasan Vickers yang diberi beban 5.000 g menghasilkan indentasi dengan diagonal 327 μm dan 325 μm . Hitung VHN material tersebut.
11. Sebuah spesimen logam memiliki diameter awal 12,8 mm dan panjang ukur 50,80 mm. Spesimen ditarik hingga patah. Diameter pada titik patahan adalah 6,60 mm dan panjang ukur patah adalah 72,14 mm.
 - a. Hitung keuletan dengan rumus reduksi penampang dan persen elongasi.
 - b. Apakah kedua nilai keuletan memiliki nilai yang sama? Mengapa?
 - c. Jika kedua nilai keuletan berbeda, manakah nilai keuletan yang akan Anda gunakan dalam memilih material untuk aplikasi struktural bangunan?
12. Sebuah spesimen logam hipotetis memiliki diameter 8,0 mm. Beban tarik sebesar 1000 N menghasilkan pengurangan diameter elastis sebesar $2,8 \times 10^{-4}$ mm. Hitung modulus elastisitas (modulus Young) dari logam tersebut apabila rasio Poisson-nya adalah 0,30.
13. Sebuah batangan silinder memiliki diameter 18,8 mm dan panjang 198 mm. Batangan tersebut dideformasi elastis tarik dengan beban 49.400 N. Bila modulus elastis adalah 67,1 GPa dan rasio Poisson adalah 0,34, tentukan:
 - a. Besar elongasi (dalam mm) pada arah pembebanan.
 - b. Perubahan diameter (dalam mm). Gunakan tanda positif untuk penambahan diameter dan tanda negatif untuk pengurangan diameter.
14. Sebuah batangan silinder memiliki diameter 10 mm. Beban tarik sebesar 1500 N menghasilkan pengecilan diameter sebesar $6,7 \times 10^{-4}$ mm.
 - a. Hitung modulus elastisitas dari paduan batangan tersebut jika rasio Poisson adalah 0,35.
 - b. Bila deformasi plastis mulai terjadi pada beban 280 MPa, berapakah panjang maksimum spesimen dapat ditarik tanpa mengalami deformasi plastis.
15. Sebuah spesimen logam silinder memiliki diameter 12,7 mm dan panjang 250 mm yang akan diberi tegangan tarik sebesar 28 MPa. Pada tegangan ini, deformasi yang terjadi seluruhnya elastis.
 - a. Bila elongasi harus lebih kecil dari 0,08 mm, manakah logam dari tabel di bawah yang merupakan kandidat material yang sesuai? Mengapa?
 - b. Jika sebagai tambahan persyaratan adalah pengurangan diameter yang diizinkan maksimum adalah $1,2 \times 10^{-3}$ mm, manakah logam dari tabel di bawah yang dapat digunakan? Mengapa?

Paduan	Modulus Elastisitas (MPa)	Modulus Geser (MPa)	Rasio Poisson
Aluminium	69	25	0,33
Kuningan	97	37	0,34
Tembaga	110	46	0,34
Magnesium	45	17	0,29
Nikel	207	76	0,31
Baja	207	83	0,30
Titanium	107	45	0,34
Tungsten	407	160	0,28

16. a. Hitung konduktivitas listrik dari sebuah spesimen silikon yang berdiameter 5,1 mm dan memiliki panjang 51 mm serta dilewati arus 0,1 A pada arah aksial. Tegangan sebesar 12,5 V terukur di antara 2 titik yang dipisahkan sejauh 38 mm.
b. Hitung resistansi di keseluruhan 51 mm panjang spesimen tersebut.
17. Sebuah kabel tembaga sepanjang 100 m harus mengalami penurunan tegangan kurang dari 1,5 V ketika sebuah aliran listrik 2,5 A melewatinya. Menggunakan data pada Tabel 3.3 (konduktivitas listrik beberapa material), hitung diameter minimum dari kabel tersebut.
18. Sebuah kabel aluminium berdiameter 4 mm harus memiliki resistansi tidak lebih dari 2,5 W. Menggunakan data pada Tabel 3.3, hitung panjang maksimum dari kabel tersebut.
19. Sebuah kabel sepanjang 0,20 m dan memiliki 200 gulungan membawa arus sebesar 10 Ampere.
 - a. Berapa besar kekuatan medan magnet H ?
 - b. Hitung densitas fluks B jika kabel berada dalam vakum.
 - c. Hitung densitas fluks di dalam batangan titanium yang diletakkan di dalam gulungan kabel. Suseptibilitas titanium dapat dilihat pada Tabel 3.5
20. Sebuah pelat baja terkorosi ditemukan di sebuah kapal yang tenggelam di samudra. Diperkirakan luas permukaan asli dari pelat tersebut adalah 10 inci² dan seberat 2,6 kg material telah terkorosi. Asumsikan bahwa CPR (laju penetrasi korosi) baja ini di dalam air laut adalah 200 mpy. Perkirakan berapa tahun pelat tersebut telah terbenam. Berat jenis baja adalah 7,9 g/cm³.
21. Sebuah pelat baja tebal dengan luas permukaan 400 cm² terekspos di udara tepi samudra. Setelah satu tahun, terjadi kehilangan berat 375 g akibat korosi. Hitung laju korosi, baik dalam satuan mpy maupun mm/tahun.

SIFAT, APLIKASI, DAN PEMROSESAN LOGAM FERO

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

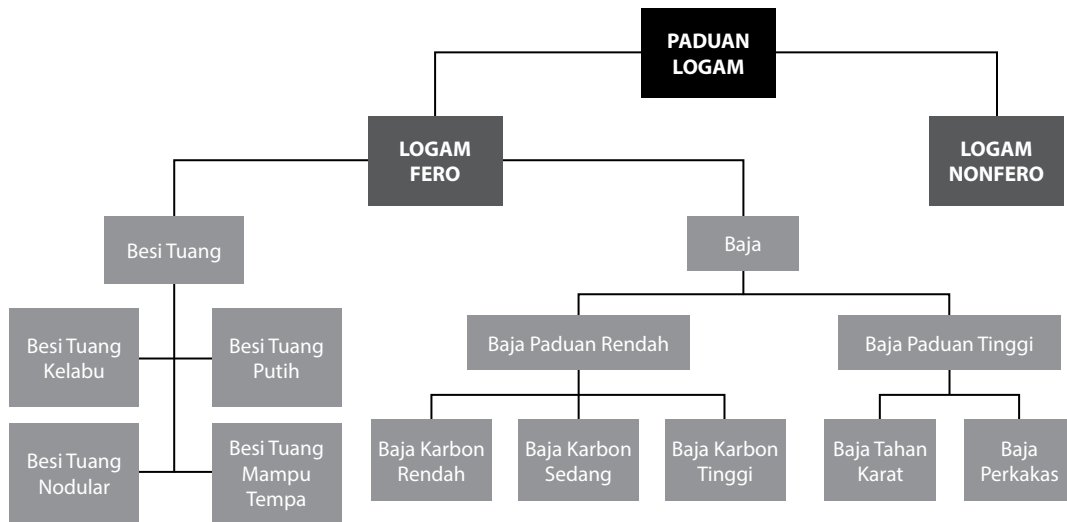
1. Menyebutkan beberapa jenis baja serta menjelaskan komposisi, sifat utama, dan aplikasinya.
2. Menyebutkan beberapa jenis besi tuang serta menjelaskan komposisi, sifat utama, dan aplikasinya.
3. Menjelaskan proses pembentukan logam.
4. Menjelaskan proses pembuatan baja, mulai dari bijih hingga menjadi barang jadi.

4.1 Pendahuluan

Material logam secara umum dapat diklasifikasikan dalam dua kelas, yaitu logam fero dan logam nonfero. Logam fero memiliki unsur utama, yaitu besi (Fe), yang terdiri atas besi tuang dan baja. Sementara itu, material logam lainnya yang tidak memiliki Fe sebagai unsur utama disebut sebagai logam non-fero. Logam non-fero yang akan dibahas pada buku ini mencakup aluminium, tembaga, titanium, magnesium, paduan super, paduan refraktori, dan logam mulia. Material logam nonfero lainnya akan dibahas pada Bab 5.

Pembagian kelas paduan (logam) fero dapat dilihat pada Gambar 4.1. Paduan fero diproduksi dalam jumlah lebih besar jika dibandingkan dengan paduan logam lainnya, terutama untuk aplikasi konstruksi dan manufaktur. Berikut ini adalah alasannya.

1. Bahan logam tersedia di alam dalam jumlah besar.
2. Paduan besi dan baja dapat diproduksi dengan biaya relatif rendah (baik untuk biaya ekstraksi, pemurnian, maupun pemrosesan).
3. Paduan besi baja memiliki karakteristik yang bervariasi sehingga dapat dipakai untuk banyak aplikasi.



GAMBAR 4.1 Klasifikasi paduan logam.

4.2 Proses Pembuatan Besi dan Baja

Secara skematis, berikut ini adalah pembuatan besi dan baja—digambarkan pada Gambar 4.2, yang terdiri atas tiga tahap.

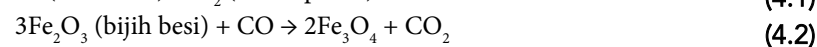
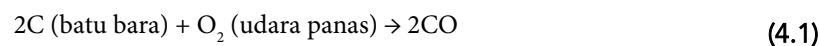
1. Reduksi bijih besi: Pemrosesan dari bijih besi menjadi besi.
2. Pemurnian baja: Penurunan kadar karbon (C) dalam besi menjadi bahan baja setengah jadi.
3. Pembentukan: Pengubahan bentuk bahan baja setengah jadi menjadi bahan jadi.

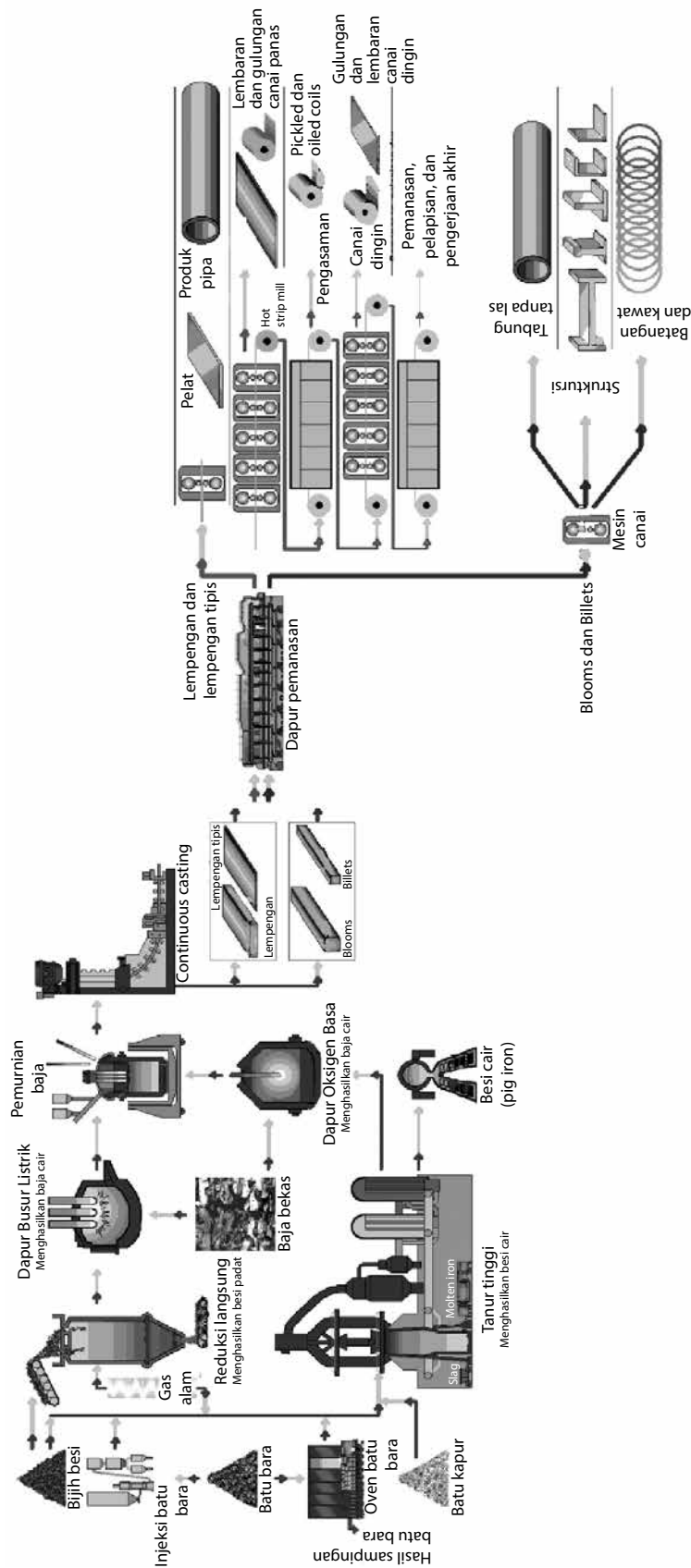
Reduksi Bijih Besi

Ada dua jenis proses reduksi bijih besi, yaitu reduksi tidak langsung dan reduksi langsung.

Reduksi Tidak Langsung

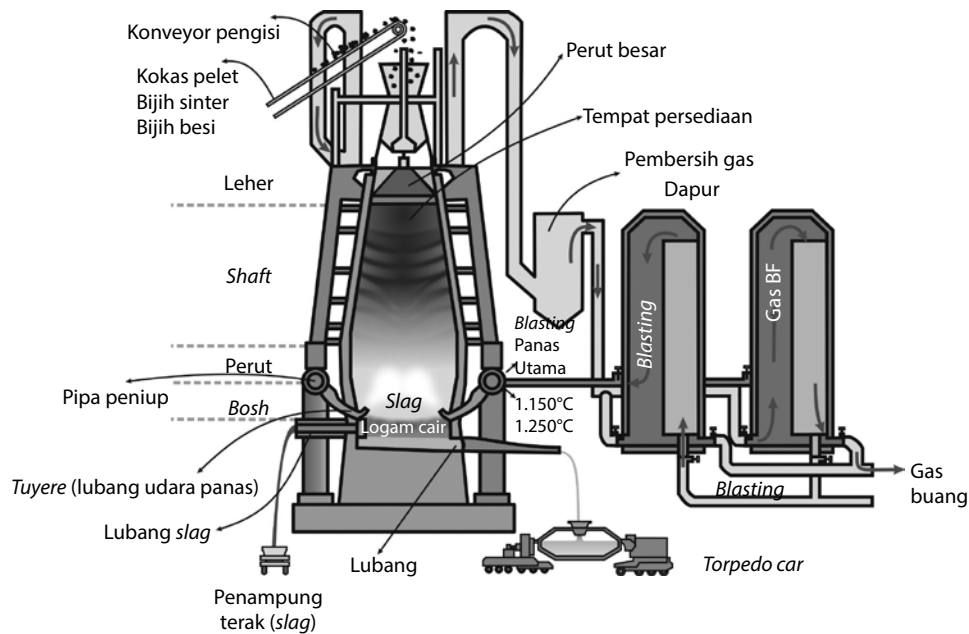
Proses reduksi tidak langsung dilakukan di dalam **tanur tinggi (blast furnace)**, lihat Gambar 4.3. Sekitar 94% produksi besi kasar di dunia dibuat melalui proses reduksi di dalam tanur tinggi. Pada proses ini, material yang dimasukkan adalah bijih besi yang sudah dimurnikan (Fe_2O_3), batu bara, dan batu kapur (*limestone*, CaCO_3). Untuk memproduksi satu ton besi cair, sekitar 1.600 kg bijih besi dan 90–120 kg batu bara dimasukkan ke dalam tanur tinggi secara berlapis-lapis. Dari bagian bawah tanur tinggi, udara panas bertekanan (dengan kisaran temperatur 1.150–1.250°C) dihembuskan. Akibatnya, terjadi reaksi di dalam tanur tinggi, yang dijelaskan dalam persamaan-persamaan berikut.



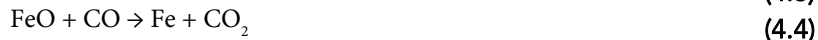


GAMBAR 4.2 Proses pembuatan besi baja.

Sumber: Diadaptasi dari Kawasaki Steel 21st Century Foundation, <http://www.jfe-21st-cf.or.jp>.



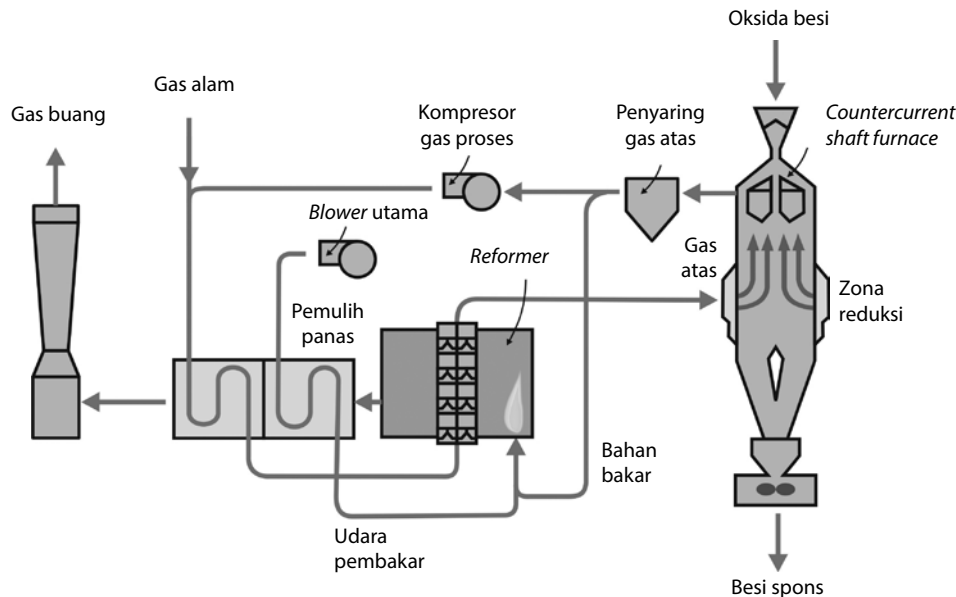
GAMBAR 4.3 Proses reduksi tidak langsung menggunakan tanur tinggi.



Jika kita lihat reaksi atau persamaan sebelumnya [Persamaan (4.1) hingga (4.5)] maka tampak bahwa gas reduktor CO dihasilkan dari reaksi antara batu bara dan udara panas. Jadi, gas reduktor tidak dimasukkan secara langsung ke dalam tanur tinggi, tetapi dihasilkan dari proses di dalam tanur tinggi. Oleh karena itu, proses ini dikenal sebagai proses reduksi tidak langsung.

Gas reduktor CO kemudian mereduksi bijih besi secara bertahap sehingga menjadi Fe (besi) dalam keadaan cair karena reaksinya bersifat eksotermis. Gas CO_2 —yang dihasilkan dari reaksi reduksi bijih besi ini—akan bereaksi kembali dengan batu bara menjadi gas CO. Batu kapur yang ditambahkan akan bereaksi dengan pengotor-pengotor yang ada di dalam bijih besi membentuk terak (*slag*) yang akan mengapung di atas besi cair karena berat jenisnya yang lebih rendah.

Material yang dihasilkan dari tanur tinggi adalah **besi cair**—yang sering disebut dengan **pig iron**—pada temperatur 1.530°C. Untuk setiap ton besi cair, biasanya terdapat sekitar 300 kg terak, yang setelah dingin dapat dihancurkan dan dapat dipakai sebagai bahan pencampur semen. Besi cair mengandung 3–4% karbon, yang kemudian dituangkan ke dalam *torpedo car*, dan langsung mengalami proses *hot metal pre-treatment* untuk mengurangi kadar fosfor (defosforisasi) dan dikirim ke proses pemurnian baja (untuk diturunkan kadar karbonnya).



GAMBAR 4.4 Proses reduksi langsung dengan metode Midrex.

Reduksi Langsung

Terdapat beberapa metode proses reduksi langsung, yaitu Midrex, HYL-I, HYL-II, HYL-III, Fion, Finmet, Circored, dan lain-lain. Metode yang paling sukses dan paling banyak digunakan adalah metode Midrex, HYL-I, dan HYL-III. PT Krakatau Steel pada awal berdirinya menggunakan metode HYL-III. Secara skematis, metode Midrex dapat dilihat pada Gambar 4.4. Prinsip proses reduksi langsung adalah memasukkan gas reduktor ke dalam tanur sehingga terjadi reaksi reduksi bijih besi. Pada metode Midrex, gas reduktor yang dimasukkan adalah gas alam dengan rasio $H_2/CO = 1,6$ pada temperatur $900^\circ C$. Sementara pada metode HYL-III, rasio $H_2/CO = 3$ pada temperatur $930^\circ C$. Gas reduktor ini kemudian mereduksi bijih besi yang dimasukkan melalui bagian atas tanur. Reaksi reduksi bersifat endotermik sehingga tidak terjadi pencairan bijih besi dan produk yang dihasilkan adalah besi kasar padat, yang sering disebut sebagai besi spons (*sponge iron*). Efektivitas reduksi maksimum adalah 95% dan kadar karbon pada besi spons adalah 2,5%. Besi spons berpori dan memiliki luas permukaan aktif yang besar sehingga sangat sensitif terhadap udara (atau mudah terbakar) ketika dipindahkan dalam jumlah yang besar. Selain itu, lokasi pabrik harus dekat dengan sumber gas alam. Oleh karena itu, proses reduksi langsung tidak populer. Dari sekitar 550 juta ton produksi besi kasar di seluruh dunia, hanya sekitar 6% yang diproduksi dengan metode reduksi langsung (termasuk yang diproduksi oleh PT Krakatau Steel sebelum beralih ke tanur tinggi).

Pemurnian Baja

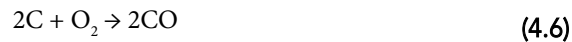
Besi kasar hasil reduksi langsung dan tidak langsung kemudian dikirim ke bagian **pemurnian baja (steel refining)** untuk diturunkan kadar karbonnya sehingga dapat dihasilkan baja.

Berikut ini adalah dapur yang paling banyak digunakan untuk memurnikan baja.

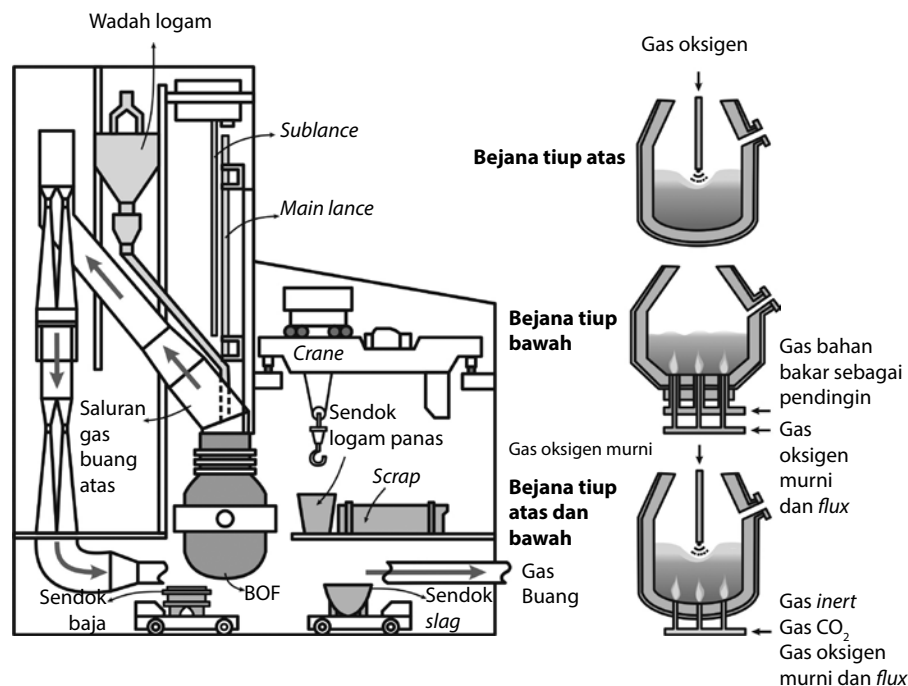
1. Dapur Oksigen Basa (*Basic Oxigen Furnace—BOF*)
2. Dapur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace—EAF*)

Dapur Oksigen Basa

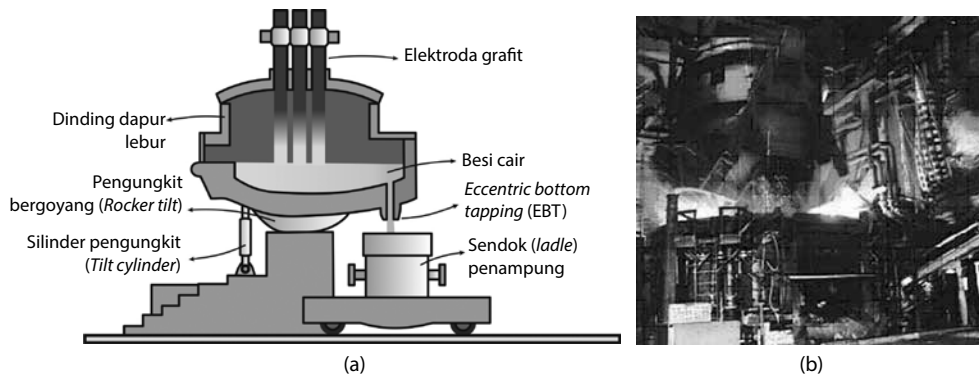
Ilustrasi dari **Dapur Oksigen Basa (*Basic Oxigen Furnace—BOF*)** dapat dilihat pada gambar 4.5. Prinsip pemurnian baja pada BOF adalah meniupkan gas oksigen kedalam besi cair sehingga terjadi reaksi sesuai dengan persamaan



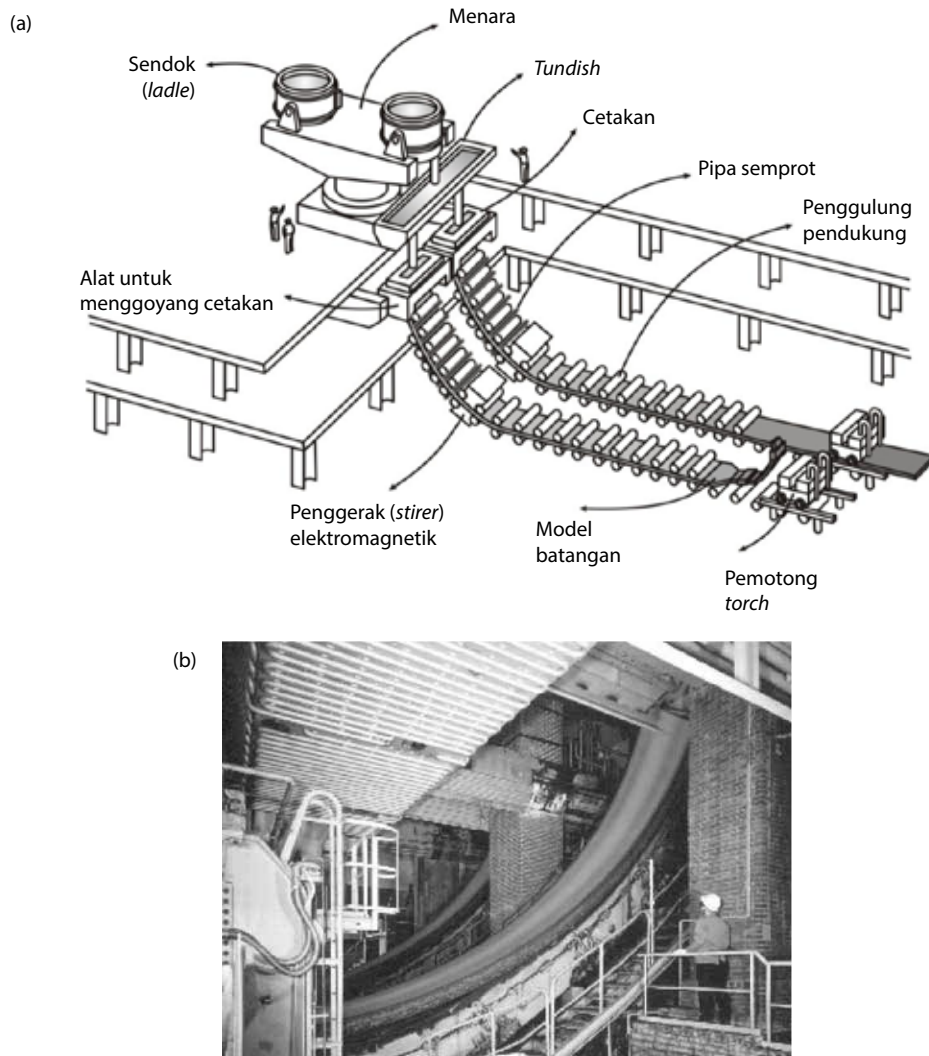
Oksigen bereaksi dengan karbon di dalam besi cair menjadi gas karbon monoksida yang kemudian keluar dari logam cair. Akibatnya, kadar karbon di dalam besi cair menjadi turun. Oksigen dimasukkan dengan tekanan tinggi melalui selang (*lance*). Selang dapat dimasukkan dari atas (*top-blown vessel*), dari bawah (*bottom-blown vessel*), atau kombinasi keduanya (*top and bottom-blown vessel*). Selain oksigen, batu kapur ($CaCO_3$) juga dimasukkan, yang akan bereaksi dengan Si, besi oksida, dan (material) pengotor lainnya, membentuk terak $CaO-SiO_2-FeO$ sehingga baja menjadi lebih murni. Waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan kadar karbon 200 ton besi cair dari 4,3% menjadi 0,04% adalah sekitar 20 menit. Setelah proses meniupan oksigen selesai, baja cair dituang dengan menyaring terak yang dihasilkan. Karena produktivitas yang tinggi ini, sekitar 51% produksi baja di dunia dibuat melalui proses Dapur Oksigen Basa.



GAMBAR 4.5 Proses pemurnian baja menggunakan Dapur Oksigen Basa (*Basic Oxigen Furnace—BOF*).



GAMBAR 4.6 (a) Ilustrasi skematis Dapur Busur Listrik, (b) Dapur Busur Listrik berkapasitas 120 ton.



GAMBAR 4.7 Proses *continuous casting*: (a) ilustrasi skematis, (b) pada sebuah pabrik pembuatan baja.

Sumber: Diadaptasi dari Kawasaki Steel 21st Century Foundation, <http://www.jfe-21st-cf.or.jp>.

Dapur Busur Listrik

Ilustrasi dan gambar **Dapur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace—EAF*)** dapat dilihat pada Gambar 4.6. Bahan yang dimasukkan ke dalam EAF adalah besi spons, *pig iron* dalam keadaan padat, dan besi bekas (*scrap*). Besi bekas adalah bahan terbanyak yang dimasukkan ke dalam EAF. Pada tutup EAF, terdapat katoda di bagian atas dan terdapat anoda pada dasar dapur. Kedua elektroda (anoda dan katoda) terbuat dari grafit yang kemudian dialiri dengan listrik. Karena elektroda dialiri listrik dan ada jarak sempit antara ujung katoda dan permukaan logam (besi) maka akan timbul bunga api dengan temperatur tinggi yang akan meleburkan besi. Oksigen dialirkan ke dalam besi cair untuk mengurangi kadar karbon. Selain itu, *flux* juga ditambahkan ke dalam logam cair—yang akan mengeluarkan pengotor, seperti silikon, sulfur, fosfor, aluminium, dan kalsium (sehingga terjadi pemurnian). *Flux* yang dipakai adalah CaO dalam bentuk batu kapur (CaCO_3) atau MgO dalam bentuk *dolomite* atau *magnesite*. Setelah komposisi yang diinginkan diperoleh maka dilakukan penuangan baja cair ke dalam cetakan, menjadi *slab*, atau langsung ke dalam *tundish* pada proses *continuous casting*, yang menghasilkan *slab* berukuran lebih tipis. Proses *continuous casting* dapat dilihat pada Gambar 4.7. Waktu yang diperlukan untuk satu siklus penuangan berkisar antara 90–100 menit yang juga bergantung pada ukuran dapur. Karena bahan *input* terbesar adalah besi bekas, baja yang dihasilkan oleh EAF biasanya bukanlah jenis baja yang berkualitas tinggi.

Pemurnian Sekunder

Untuk memproduksi baja berkualitas tinggi, seperti baja perkakas (*tool steel*), baja tahan karat (*stainless steel*), dilakukan proses pemurnian kedua setelah dari Dapur Oksigen Basa (BOF) atau dari Dapur Busur Listrik (EAF). Ada beberapa jenis dapur untuk **proses pemurnian sekunder (*secondary refining*)**, seperti *Ladle Furnace* (LF), *Argon-Oxygen Decarburization Furnace* (AOD), *Vacuum-Oxygen Decarburization Furnace* (VOD), dan *RH type degassing unit* (RH).

4.3 Baja

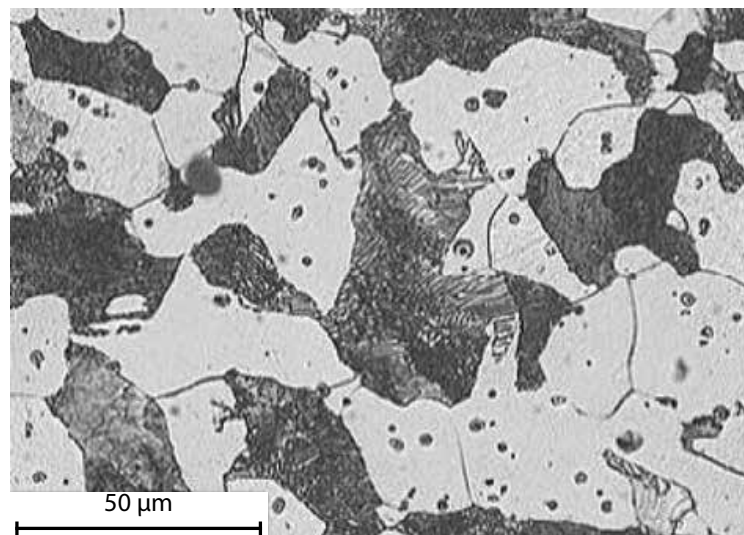
Baja adalah paduan unsur besi (Fe) dan karbon (C) dengan kandungan karbon kurang dari 2%. Terdapat ribuan jenis baja yang tersedia di pasar, yang mana berbeda komposisi kimia dan proses perlakuan panasnya. Sesuai klasifikasi paduan logam fero pada Gambar 4.1, baja dapat dibagi menjadi dua golongan besar, sebagai berikut.

1. Baja paduan rendah (*low alloy steel*), seperti (a) baja karbon rendah, (b) baja karbon sedang, dan (c) baja karbon tinggi.
2. Baja paduan tinggi (*high alloy steel*), seperti (a) baja tahan karat dan (b) baja perkakas.

Pada baja paduan rendah, hanya terdapat sedikit unsur paduan selain karbon dan sedikit mangan. Sementara pada baja paduan tinggi, unsur-unsur lain sengaja dimasukkan untuk meningkatkan karakteristik tertentu dari baja tersebut. Sifat mekanik baja sangat sensitif terhadap kandungan karbon, di mana semakin tinggi kadar karbon, semakin tinggi kekuatan dan kekerasan baja tersebut.

Baja Karbon Rendah

Dibandingkan dengan jenis baja lainnya, baja karbon rendah merupakan jenis baja yang diproduksi dalam jumlah terbesar. Kadar karbon baja ini kurang dari 0,25 wt.%, serta struktur mikronya terdiri atas ferit dan perlit (*lihat Gambar 4.8*), sehingga bersifat lunak, tetapi memiliki keuletan dan ketangguhan yang sangat baik. Baja ini dapat dimesin (dibubut) dan dilas, tetapi tidak responsif terhadap perlakuan panas. Artinya, baja ini tidak membentuk struktur martensit ketika didinginkan dengan cepat. Beberapa aplikasi dari baja ini, seperti bodi mobil, serta lembaran baja untuk pipa, kaleng, dan bentuk struktural (misal: I, H, L, dan lain-lain). Komposisi dan aplikasi dari baja karbon rendah dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan 4.2.



GAMBAR 4.8 Struktur mikro baja karbon rendah yang terdiri atas ferit (warna putih) dan perlit (warna gelap)

Sumber: Diadaptasi dari <http://pwtatlas.mt.umist.ac.uk/internetmicroscope/micrographs/microstructures/low-carbon-steel.html>.

Penamaan baja berdasarkan standar AISI (American Institute for Steel and Iron) terdiri atas empat digit, di mana dua digit pertama menunjukkan kandungan paduan baja dan dua digit terakhir menunjukkan kandungan karbon dikalikan dengan seratus. Untuk baja karbon, dua digit pertama adalah 1 dan 0, sementara baja paduan memiliki dua digit pertama dapat berupa suatu kombinasi (misal: 13, 41, 43). Sebagai contoh, AISI 1060. Dua digit pertama, yaitu 10, menunjukkan klasifikasi baja karbon rendah. Dua digit terakhir, yaitu 60, menunjukkan kandungan karbon sebesar 0,60 wt.%.

TABEL 4.1 Komposisi beberapa baja karbon rendah dan baja paduan rendah berkekuatan tinggi (*high strength low alloy steel*).

Penandaan ^a		Komposisi (wt.%) ^b		
AISI/SAE atau ASTM	UNS	C	Mn	Lainnya
Baja Karbon Rendah				
1010	G10100	0,10	0,45	
1020	G10200	0,20	0,45	
A36	K02600	0,29	1,00	0,20 Cu (min.)
A516 Kelas 70	K02700	0,31	1,00	0,25 Si
Baja Paduan Rendah Berkekuatan Tinggi				
A440	K12810	0,28	1,35	0,30 Si (maks.) 0,2 Cu (min.)
A663 Kelas E	K12002	0,22	1,35	0,30 Si (maks.); 0,08; 0,02 N; 0,13 Nb
A656 Kelas I	K11804	0,18	1,60	0,60 Si; 0,1 V; 0,20 Al; 0,0015 N

^a Kode digunakan oleh American Iron and Steel Institute (AISI), Society of Automotive Engineers (SAE), serta American Society for Testing and Materials (ASTM). Demikian juga, dalam *Unified Numbering System* (UNS) yang dijelaskan dalam teks.

^b Hanya maksimum dari 0,04 wt.% P; 0,05 wt.% S; dan 0,30 Si (kecuali diindikasikan sebaliknya).

Sumber: Diadaptasi dari William D. Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Edisi ke-8 (John Wiley & Sons, Inc., 2010).

TABEL 4.2 Sifat mekanik dan aplikasi beberapa baja karbon rendah dan baja paduan rendah berkekuatan tinggi.

AISI/SAE atau ASTM	Kekuatan Tarik [MPa (ksi)]	Kekuatan Luluh [MPa (ksi)]	Keuletan [%EL dalam 50 mm (2 inci)]	Jenis Aplikasi
Baja Karbon Rendah				
1010	325 (47)	180 (26)	28	Panel mobil, paku, dan kawat
1020	380 (55)	205 (30)	25	Pipa, serta baja lembaran dan struktural
A36	400 (58)	220 (32)	23	Struktural (jembatan dan bangunan)
A516 Kelas 70	485 (70)	260 (38)	21	Bejana tekan dengan temperatur rendah
Baja Paduan Rendah Berkekuatan Tinggi				
A440	435 (63)	290 (42)	21	Struktur yang dibuat atau paku keling
A663 Kelas E	520 (75)	380 (55)	23	Struktur yang digunakan pada temperatur rendah <i>ambient</i>
A656 Kelas I	655 (95)	552 (80)	15	Kerangka truk dan rel kereta

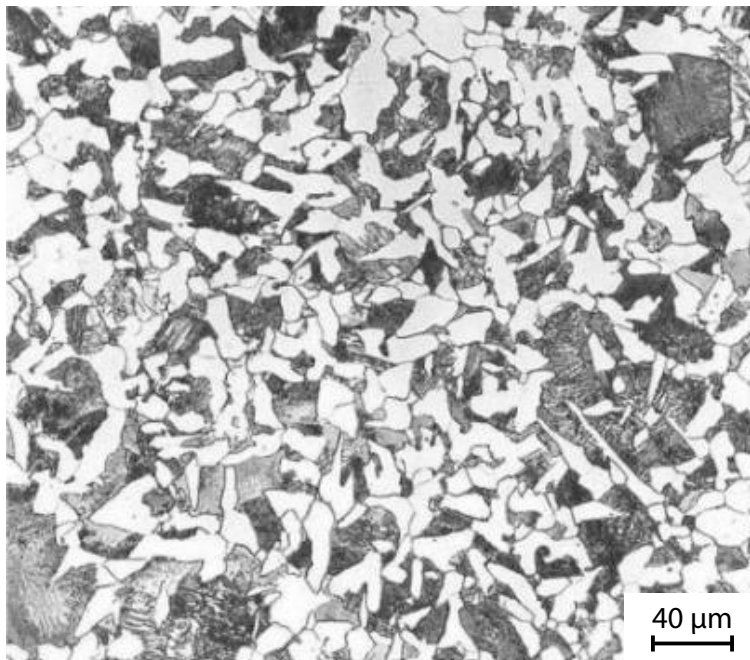
Sumber: Diadaptasi dari William D. Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Edisi ke-8 (John Wiley & Sons, Inc., 2010).

Catatan: Anda bisa mencari dari berbagai sumber referensi tentang sistem penamaan/ penandaan lain, seperti sistem penamaan baja dan logam lain dengan sistem penamaan dari ASTM (*American Society for Testing and Materials*), SAE (*The Society of Automotive Engineer*), atau UNS (*Unified Numbering System*).

Kelompok lain dari baja karbon rendah adalah **baja paduan rendah berkekuatan tinggi** atau yang dikenal juga sebagai baja **HSLA**. Kelompok baja ini mengandung unsur paduan, seperti tembaga, vanadium, nikel, dan molibdenum yang totalnya dapat mencapai 10 wt.%. Kekuatannya jauh lebih tinggi daripada baja karbon rendah biasa. Kekuatannya dapat mencapai 480 MPa dan umumnya lebih tahan korosi. Aplikasi baja HSLA adalah digunakan untuk jembatan, menara, *pressure vessel*, dan lain-lain.

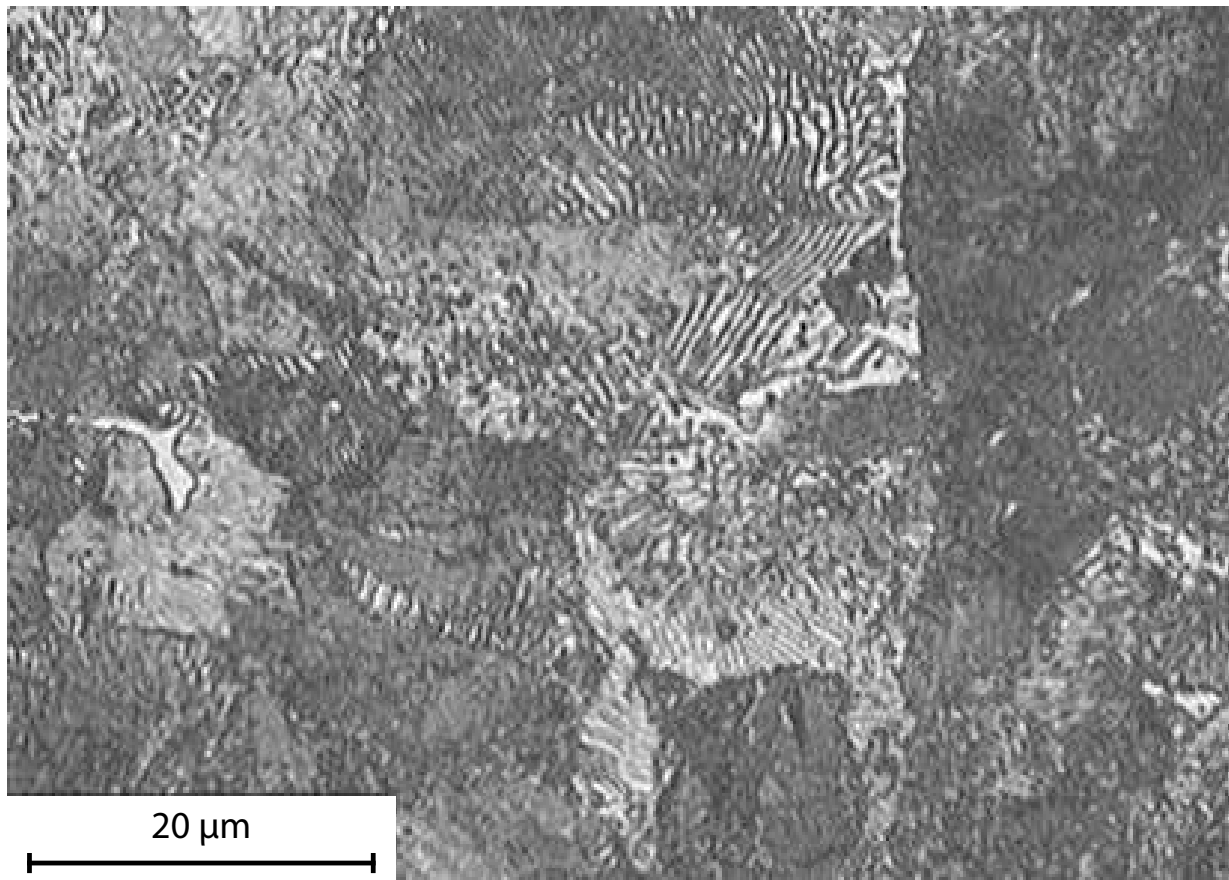
Baja Karbon Sedang

Baja karbon sedang (lihat Gambar 4.9) mengandung karbon sebesar 0,25–0,60 wt.%. Baja ini lebih kuat daripada baja karbon rendah, tetapi memiliki keuletan dan ketangguhan yang lebih rendah, serta dapat diberi perlakuan panas untuk meningkatkan kekuatannya. Aplikasi dari baja ini, seperti rel kereta, roda gigi, *crankshaft*, dan lain-lain. Salah satu jenis baja karbon sedang yang banyak digunakan adalah baja profil I. Baja ini telah memiliki SNI (Standar Nasional Indonesia) nomor 07-0329-2005.



GAMBAR 4.9 Struktur mikro baja karbon sedang yang terdiri dari ferit (warna putih) dan perlit (warna gelap).

Sumber: Diadaptasi dari <http://practicalmaintenance.net?p=1559>.



GAMBAR 4.10 Struktur mikro baja karbon tinggi yang terdiri dari perlit (warna gelap bergaris) dan sementit (Fe_3C) berwarna putih yang terdapat di batas butir.

Sumber: Diadaptasi dari <http://pwtatlas.mt.umist.ac.uk/internetmicroscope/micrographs/microstructures/high-carbon-steel.html>.

Baja Karbon Tinggi

Baja karbon tinggi mengandung karbon sebesar 0,60–1,40 wt.%, dan merupakan baja karbon yang paling kuat dan paling keras, serta tidak ulet. Struktur mikro baja ini terdiri atas perlit dan sementit (Fe_3C) yang sangat keras dan terdapat di batas butir (lihat Gambar 4.10). Baja ini umumnya dipakai dalam kondisi dikeraskan dan ditemper, sehingga memiliki ketahanan aus yang tinggi. Baja karbon tinggi yang memiliki paduan yang tinggi—**baja perkakas** dan **baja cetakan (die steel)**—umumnya mengandung kromium, vanadium, tungsten, dan molibdenum. Unsur-unsur ini merupakan unsur pembentuk karbida (Cr_{23}C_6 , V_4C_3 , dan lain-lain) yang sangat keras dan memiliki ketahanan aus yang tinggi. Aplikasi dari baja karbon tinggi, seperti alat potong, bantalan, cetakan, pisau, mata gergaji, dan pegas/per.

TABEL 4.3 Penamaan dan komposisi baja tahan karat.

Nama Baja	Penamaan Baja				Komposisi Kimia, %						
	EN	ASTM	UNS	JIS	C	N	Cr	Ni	Mo	Lainnya	Produk
Kelas Feritik											
4600	1.4600	–	–	–	0,02		11,2	0,85		Ti	H S
4512	1.4512	409	–	SUS409	0,02		11,5	0,2		Ti	H C S
4003	1.4003	–	S40977	–	0,02		11,5	0,5			P H C S
4000	1.4000	410S	S41008	SUS 403	0,03		12,5				P H C S
4589	1.4589	–	S42035	–	0,045		14	1,65	0,25	Ti	H C S
4016	1.4016	430	S43000	SUS 430	0,05		16,2				H C B R S
4511	1.4511	–	–	–	0,02		16,2			Nb	H C S
4520	1.4520	–	–	–	0,02		16,2			Ti	H C S
4510	1.4510	439	S43035	SUS 430LX	0,02		17			Ti	H C S
4509	1.4509	–	S43940	–	0,02		18			Ti Nb	H C S
4607	1.4607	–	–	–	0,02		19			Ti Nb	H C S
4113	1.4113	434	S43400	–	0,045		16,5		1		H C S
4513	1.4513	–	S43600	–	0,02		17		1	Ti	H C S
4521	1.4521	444	S44400	SUS 444	0,02		18		2	Ti Nb	P H C S
Kelas Martensitik dan Pengerasan Presipitasi											
4006	1.4006	410	S41000	SUS 410	0,12		12				P H C B R S
4005	1.4005	416	S41600	SUS 416	0,10		13			S	B R S
4021	1.4021	420	S42000	SUS 420J1	0,20		13				P H C B R S
4031	1.4031	420	S42000	–	0,38		13,5				H C S
4034	1.4034	420	S42000	–	0,45		13,7				H C S
4028	1.4028	420	S42000	SUS 420J2	0,30		12,5				H C B S
4313	1.4313	–	S41500	SUS Ti6NM	0,03		12,5	4,1	0,6		P S
4542	1.4542	630	S17400	SUS 630	0,02		15,5	4,8		3,4Cu Nb	B R S
4116	1.4116	–	–	–	0,5		14,4		0,55	V	H C S
4110	1.4110	–	–	–	0,5		14,8		0,63		H C S
4568	1.4568	631	S17700	SUS 631	0,08		17	7		1Al	R S
4122	1.4122	–	–	–	0,41		16,1		1		H C S
4574	1.4574	632	S15700	–	0,08		14,5	7,5	2,2	1,1Al	C S
Kelas Feritik Temperatur Tinggi											
4713	1.4713	–	–	–	0,06		6,5			0,8Si 0,8Al	P H C S
4724	1.4724	–	–	–	0,07		12,5			1Si 0,9Al	P H C S
4736	1.4736	–	–	–	0,02		17,5			1,8Al Ti	H C S
4742	1.4742	–	–	–	0,07		17,5			1Si 1A	P H C S
4762	1.4762	–	–	–	0,08		23,5			1Si 1,5Ai	P H C S
Kelas Austenitik Temperatur Tinggi											
4948	1.4948	304H	S30409	SUS 304	0,05		18,1	8,3			P H C B R S T
4878	1.4878	321H	–	SUS 321	0,05		17,3	9,1		Ti	P H C B R S T
153 MA™	1.4818	–	S30415	–	0,05	0,15	18,5	9,5		1,3Si Ce	P C R S T
4833	1.4833	309S	S30908	SUS 309	0,06		22,3	12,6			P H C B R S T
4828	1.4828	–	–	SUH 309	0,04		20	12		2Si	P H C B S
253 MA™	1.4835	–	S30815	–	0,09	0,17	21	11		1,6Si Ce	P H C B R S T
4845	1.4845	310S	S31008	SUS 310S	0,05		25	20			P H C B R S T
4841	1.4841	314	S31400	–	0,07		24,5	19,5		2Si	P H C B R S

(bersambung)

TABEL 4.3 *lanjutan.*

Kode	Keterangan Kode Produk
P	Pelat canai panas Quarto
H	Gulungan dan lembaran canai panas
C	Gulungan dan lembaran canai dingin
B	Batangan
R	Gulungan batangan
S	Setengah jadi (<i>bloom, billet</i> , batangan, lempengan)
T	Pipa
D	DUPROF™ profil berkekuatan tinggi
	Produk manufaktur

Sumber: Diadaptasi dari http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/stainless_steel_comparator.pdf.

Baja Tahan Karat

Jenis baja ini sangat tahan korosi karena kandungan kromiumnya cukup tinggi. Kandungan kromium minimum sebesar 11 wt.%. Unsur lainnya yang juga berperan meningkatkan ketahanan korosi adalah nikel dan molibdenum. Komposisi kimia, dari beberapa jenis baja tahan karat dapat dilihat pada Tabel 4.3.

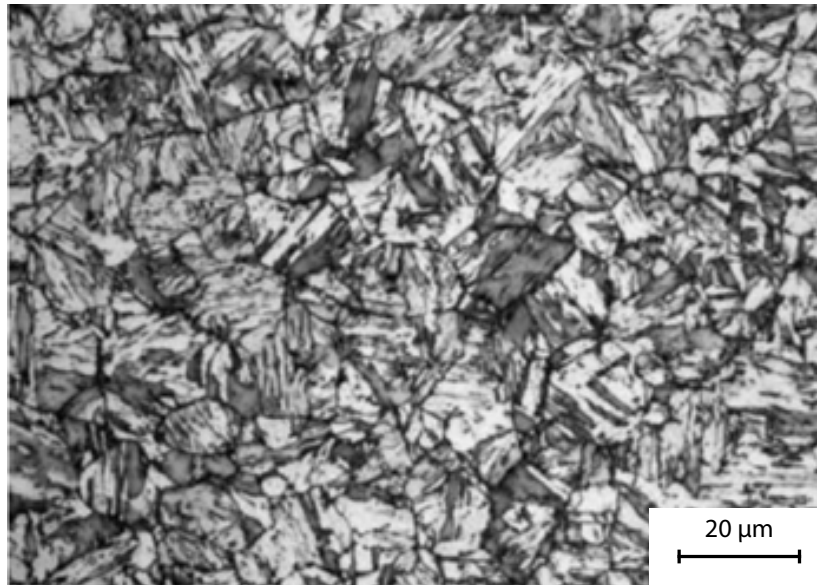
Baja tahan karat dapat dibagi menjadi lima kelas berdasarkan struktur mikronya, yaitu (1) baja tahan karat martensitik, (2) baja tahan karat feritik, (3) baja tahan karat austenitik, (4) baja tahan karat pengerasan presipitasi, dan (5) baja tahan karat dupleks.

Baja Tahan Karat Martensitik

Baja tahan karat martensitik merupakan baja tahan karat dengan karbon sedang yang memiliki kandungan kromium 12–18 wt.% dan nikel 2–4 wt.%. Kadar karbon yang lebih tinggi dari baja tahan karat lainnya menyebabkan baja ini memiliki kemampukerasan (*hardenability*) dan kekuatan yang lebih tinggi. Struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 4.11. Karakteristik dari baja tahan karat martensitik selain memiliki kemampukerasan dan kekuatan yang tinggi, juga memiliki sifat magnetik. Aplikasi baja ini meliputi pisau, pisau bedah, aplikasi bedah medis, dan sistem kendara pada pesawat terbang.

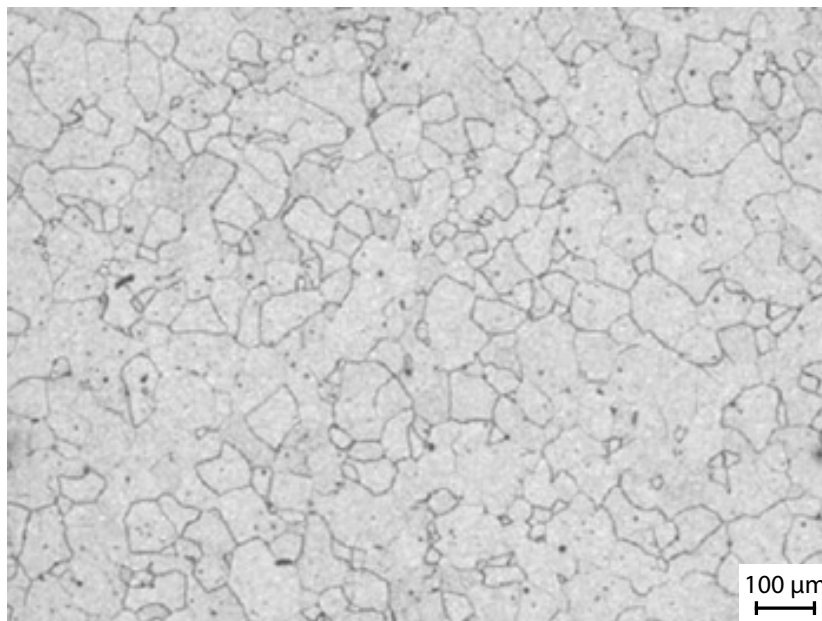
Baja Tahan Karat Feritik

Baja tahan feritik merupakan baja tahan karat berkadar karbon rendah dan dengan paduan kromium sebanyak 11,2–19% berat tanpa atau dengan sedikit penambahan nikel. Unsur molibdenum ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan korosi, sedangkan niobium ditambahkan untuk meningkatkan kemampuan las. Aplikasi baja ini meliputi pisau cukur, alat potong pada otomotif, dan katup magnetik. Struktur mikro dari jenis baja ini dapat dilihat pada Gambar 4.12.



GAMBAR 4.11 Struktur mikro baja tahan karat martensitik yang terdiri dari struktur martensit halus yang tumbuh dalam butir *prior austenite* dan terdapat juga karbida kecil.

Sumber: Diadaptasi dari situs web Outokumpu, <http://www.outokumpu.com/en/products-properties/more-stainless/stainless-steel-types/pages/default.aspx>.

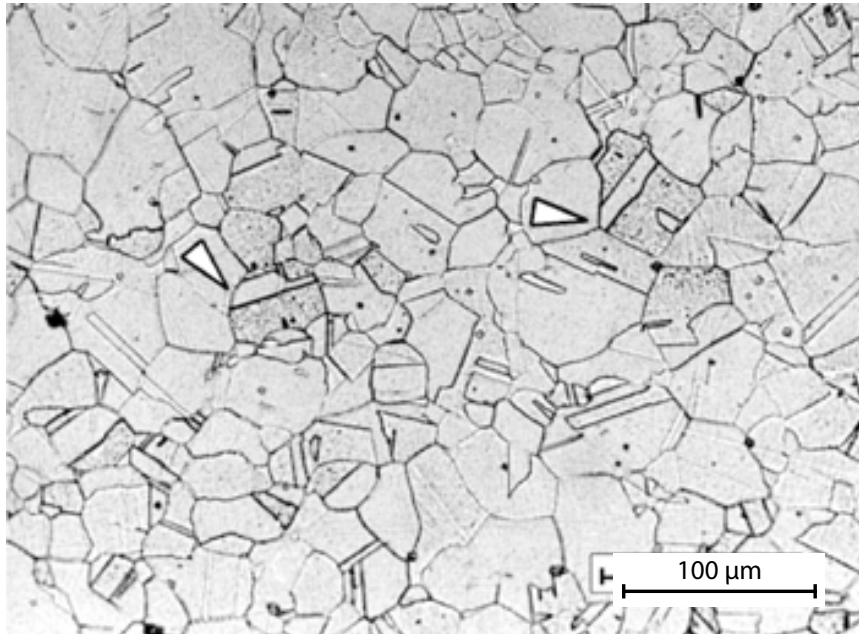


GAMBAR 4.12 Struktur mikro baja tahan karat feritik.

Sumber: Diadaptasi dari Silva, C.C., J.P. Farias, H.C. Miranda, R.F. Guimardes, J.W.A. Menezes, dan M.A.M., Neto, "Microstructural Characterization of the HAZ in AISI 444 Ferriticstainless Steel Welds", *Mat. Char.*, Vol. 59 (2008), hlm. 528–533.

Baja Tahan Karat Austenitik

Baja tahan karat austenitik memiliki komposisi karbon sebanyak 0,03–0,05 wt.%, molibdenum 2–4 wt.%, nikel 8–25 wt.%, dan kromium 17–24 wt.%. Niobium dan titanium ditambahkan



GAMBAR 4.13 Struktur mikro baja tahan karat austenitik NF709 dengan butir austenite dan twinning.

Sumber: Diadaptasi dari <http://core.materials.ac.uk/search/detail.php?id=1800>.

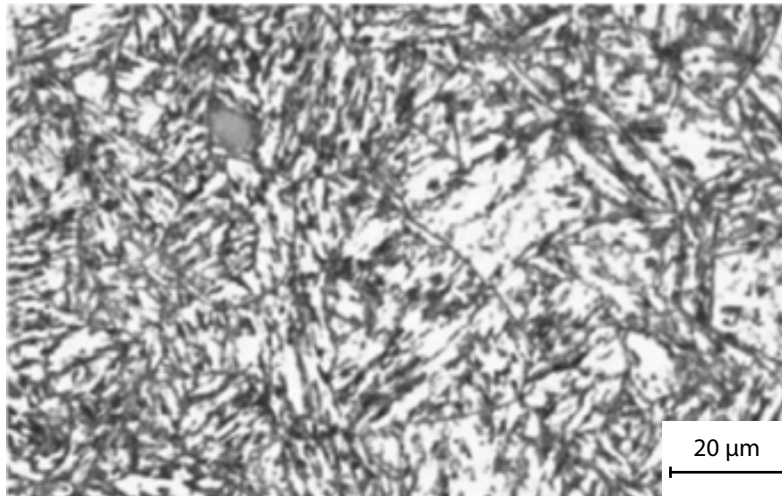
dalam kadar yang sangat rendah sebagai pembentukan karbida. Baja tahan karat austenitik merupakan jenis baja yang tidak dapat dipanaskan. Struktur mikronya dapat dilihat pada Gambar 4.13. Karakteristik dari baja ini adalah ketahanan korosi tinggi, keuletan tinggi, kemampuan bentuk dingin yang baik, serta ketahanan terhadap oksidasi asam dan alkali yang baik. Aplikasi dari baja ini meliputi implan dan baut, serta pada aplikasi dengan temperatur rendah.

Baja Tahan Karat Pengerasan Presipitasi

Baja tahan karat pengerasan presipitasi merupakan baja tahan karat martensitik yang dilakukan pengerasan presipitasi. Struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 4.14. Komposisi pada baja tahan karat ini memiliki kadar yang sama dengan baja tahan karat martensitik lainnya. Karakteristik dari baja ini adalah kombinasi kekuatan tinggi, ketahanan korosi yang baik, sifat mekanik pada temperatur 300°C, dan ketangguhan yang baik. Aplikasi baja ini terdapat pada industri penerbangan, kimia, petrokimia, dan pemrosesan makanan.

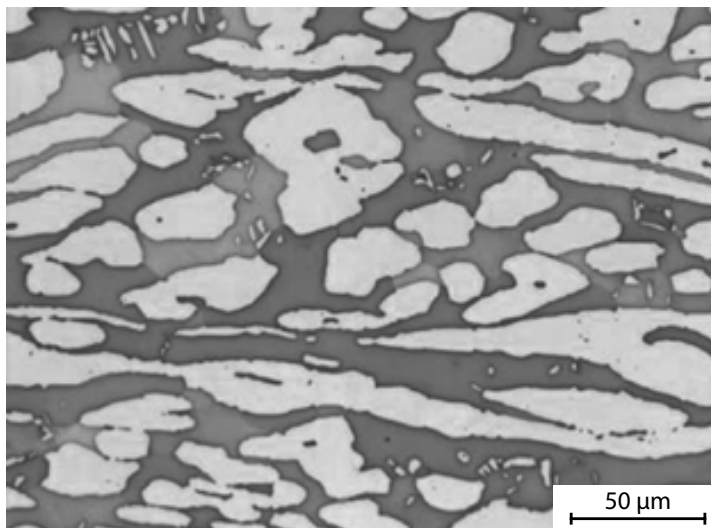
Baja Tahan Karat Dupleks

Baja tahan karat dupleks merupakan baja tahan karat perpaduan feritik dan austenitik. Struktur mikro dari perpaduan feritik dan austenitik (Gambar 4.15) ini memberikan kekuatan dan ketahanan terhadap korosi tegangan (*stress corrosion cracking*) yang tinggi. Baja tahan karat dupleks memiliki kadar kromium sebesar 20,1–25,4 wt.% dan nikel yang lebih rendah sebesar 1,4–7 wt.% dibandingkan dengan baja tahan karat austenitik. Selain nikel, terdapat molibdenum sebesar 0,3–4 wt.%. Baja tahan karat dupleks terdiri atas LDX 2101 dan 2304 yang disebut *lean duplex*, serta LDX 2507 dan 4501 yang disebut *25Cr superduplex*.



GAMBAR 4.14 Struktur mikro baja tahan karat pengerasan presipitasi ABNT PH 13-8 Mo—terlihat struktur ferit dan martensit.

Sumber: Diadaptasi dari Silva, L.C., P.R. Mota, M.B. Silva, E.O. Ezugwu, A.R. Machado, "Study of Burr Height in Face Milling of PH 13-8 Mo Stainless Steel—Transition from Primary to Secondary Burr and Benefits of Deburring Between Passes", *CIRP J. of Manufacturing Sci. and Tech.*, Vol. 10 (2015), hlm. 61–67.



GAMBAR 4.15 Struktur mikro baja tahan karat dupleks dengan bagian berbentuk lamelar berwarna gelap yang merupakan daerah feritik, sedangkan bagian berwarna terang merupakan daerah austenitik.

Sumber: Diadaptasi dari situs web Outokumpu, <http://www.outokumpu.com/en/products-properties/more-stainless/stainless-steel-types/pages/default.aspx>.

4.4 Besi Tuang

Besi tuang adalah paduan besi dan karbon dengan kandungan karbon lebih dari 2 wt.%. Secara umum, kandungan karbon tersebut berkisar antara 3–4,5 wt.%. Besi tuang memiliki titik lebur lebih rendah daripada baja. Karena mengandung kadar karbon yang tinggi, besi tuang memiliki grafit bebas di dalam struktur mikronya. Pembentukan grafit ini dibantu oleh unsur silikon yang ada di dalam besi tuang. Sifat mekanis dan struktur mikro besi tuang bergantung pada bentuk

Tabel 4.4 Penamaan, komposisi kimia, sifat mekanis, dan aplikasi dari beberapa jenis besi tuang.

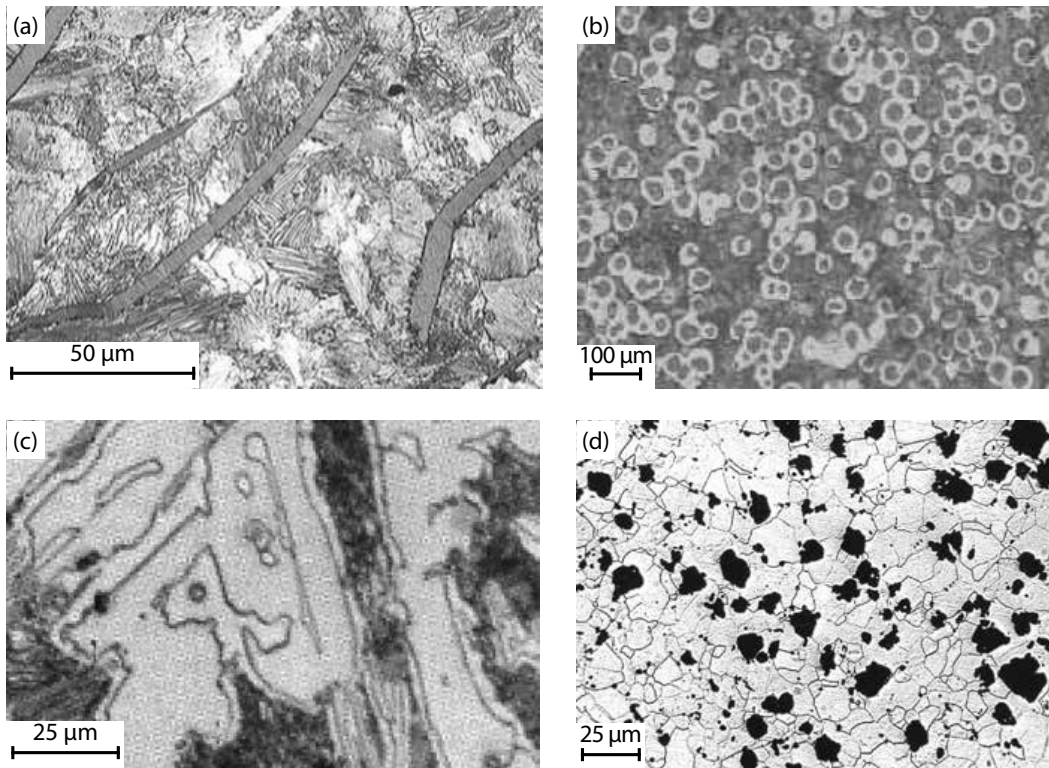
Kelas	UNS	Komposisi (%berat) ^a	Struktur Matriks	Sifat Mekanik			Jenis Aplikasi
				Kekuatan Tarik [MPa (ksi)]	Kekuatan Luluh [MPa (ksi)]	Keuletan [%EL dalam 50 mm (2 in)]	
Besi Tuang Kelabu							
SAE G1800	F10004	3,40–3,7 C; 2,55 Si; 0,7 Mn	Ferit + Perlit	124 (18)	-	-	Bermacam-macam besi tuang lunak yang kekuatannya tidak dianggap utama
SAE G2500	F10005	3,2–3,5 C; 2,20 Si; 0,8 Mn	Ferit + Perlit	173 (25)	-	-	Blok silinder, kepala silinder, piston, pelat kopling, kotak transmisi
SAE G4000	F10008	3,0–3,3 C; 2,0 Si; 0,8 Mn	Perlit	276 (40)			Pengecoran mesin diesel, liner, silinder dan piston
Besi Tuang Nodular/Ulet							
ASTM A536							
60-40-18	F32800	3,5–3,8 C; 2,0–2,8 Si; 0,05 Mg; < 0,20 Ni; < 0,10 Mo	Ferit	414 (60)	276 (40)	18	Komponen bertekanan (katup, badan pompa)
100-70-03	F34800		Perlit	689 (100)	483 (70)	3	Roda gigi berkekuatan tinggi dan komponen mesin
120-90-02	F36200		Ferit + Perlit	827 (120)	621 (90)	2	Pinion, roda gigi, canai, slide
Besi Tuang Mampu Tempa							
32510	F22200	2,3–2,7 C; 1,0–1,75 Si; < 0,55 Mn	Ferit	345 (50)	224 (32)	10	Pemakaian teknik umum pada temperatur rendah dan tinggi
45006	-	2,4–2,7 C; 1,25–1,55 Si; < 0,55 Mn	Ferit + Perlit	448 (65)	310 (45)	6	

^a Keseimbangan komposisi adalah besi.**Sumber:** Diadaptasi dari ASM Handbook Vol. 1. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, 1990.

grafit dan proses perlakuan panasnya. Berdasarkan hal tersebut, besi tuang dapat diklasifikasikan menjadi: (1) besi tuang kelabu (*grey cast iron*), (2) besi tuang nodular (*nodular cast iron*), (3) besi tuang putih (*white cast iron*), dan (4) besi tuang mampu tempa (*malleable cast iron*). Karakteristik dari beberapa jenis besi tuang dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Besi Tuang Kelabu

Besi tuang kelabu umumnya mengandung silikon sebesar 1,0–3,0 wt.%. Struktur mikro terdiri atas grafit berbentuk serpih (*flake*) di kelilingi oleh ferit atau perlit (lihat Gambar 4.16a). Grafit yang berbentuk serpih menyebabkan besi tuang ini sangat rapuh dan berwarna kelabu jika patah (ujung grafit yang tajam akan mengonsentrasikan tegangan sehingga mudah retak akibat pembebanan). Namun demikian, grafit berbentuk serpih ini mampu



GAMBAR 4.16 Struktur mikro dari (a) besi tuang kelabu dengan bentuk grafik serpih, (b) besi tuang nodular dengan bentuk grafit bulat dan matriks perlit, (c) besi tuang putih dengan struktur sementit (putih) dan perlit (gelap), (d) besi tuang mampu tempa dengan bentuk grafit berkelompok atau *rossette*.

Sumber: Diadaptasi dari <http://pwtatlas.mt.umist.ac.uk/internetmicroscope/micrographs/microstructures/castiron.html>; <http://www.stockton-castings.co.uk/ecnology/Nodular.htm>; <http://www.metallography.com/technotes/iron/whitefe.htm>; <http://www.georgesbasement.com/Microstructures/CastIronsHighAlloySteelsSuperalloys/Lesson-1/Specimen03.htm>.

meredam getaran dan menyumbangkan ketahanan aus yang tinggi pada material. Selain itu, material ini termasuk material yang murah sehingga banyak diaplikasikan mulai dari pagar rumah hingga mesin kendaraan bermotor.

Besi Tuang Nodular

Besi tuang nodular mengandung magnesium atau serium, yang bertindak sebagai pembulat grafit selama proses pembekuan. Struktur mikro terdiri atas grafit berbentuk bulat yang dikelilingi oleh ferit dan perlit (lihat Gambar 4.16b). Besi tuang ini lebih kuat dan lebih ulet apabila dibandingkan dengan besi tuang kelabu, dan sifatnya hampir mendekati sifat baja. Aplikasi dari material ini, seperti katup, badan pompa, roda gigi, dan lain-lain.

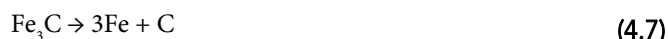
Besi Tuang Putih

Besi tuang putih mengandung silikon kurang dari 0,1 wt.% dan dibuat melalui proses pembekuan yang relatif cepat di dalam cetakan logam. Akibat pembekuan yang cepat, karbon tidak membentuk grafit bebas, tetapi membentuk sementit (Fe_3C) yang sangat keras,

di mana dikelilingi oleh perlit (lihat Gambar 4.16c). Besi tuang putih memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang sangat tinggi, tetapi sangat rapuh dan tidak dapat “dimesin/dibubut”. Oleh karena itu, pemakaian besi tuang putih juga sangat terbatas, seperti untuk *roller* pada mesin pengerolan.

Besi Tuang Mampu Tempa

Besi tuang mampu tempa dapat diperoleh dengan memanaskan besi tuang putih pada temperatur 800–900°C untuk waktu yang cukup lama sehingga sementit (Fe_3C) akan terdekomposisi menjadi besi dan karbon, sesuai dengan persamaan berikut.



Karbon yang terdekomposisi adalah grafit yang memiliki bentuk berkelompok atau *rossette* (lihat Gambar 4.16d). Oleh karena itu, besi tuang mampu tempa memiliki ketangguhan yang cukup tinggi sehingga banyak digunakan sebagai batang penghubung (*connecting rods*), roda gigi transmisi, penyambung pipa, katup, dan lain-lain.

Latihan

1. Berdasarkan prinsip pembuatan baja, jelaskan mengapa PT Krakatau Steel pada awal berdirinya memilih proses reduksi langsung? Kemudian, mengapa PT Krakatau Steel pada tahun 2013 menutup proses reduksi langsung tersebut dan menggantinya menjadi proses reduksi tidak langsung?
2. Jelaskan prinsip pemurnian baja menggunakan Dapur Oksigen Basa.
3. Mengapa besi dan baja merupakan salah satu jenis material yang paling banyak digunakan untuk aplikasi rekayasa.
4. Berdasarkan karakteristik beban yang dialami oleh sebuah mobil, perkirakan jenis material logam fero yang digunakan untuk membuat: (a) kap mesin, (b) rangka, (c) *intake manifold*, (d) piston, (e) roda gigi transmisi, (f) batang penghubung (*connecting rod*), dan (g) crankshaft.
5. Jelaskan fungsi unsur paduan di dalam baja perkakas.
6. Berdasarkan struktur mikro, jelaskan mengapa besi tuang kelabu bersifat rapuh dan memiliki kekuatan tarik yang rendah.
7. a. Apakah jenis material yang umum digunakan dalam pembuatan bodi mobil?
Mengapa industri otomotif menggunakan material tersebut?
b. Mengapa bodi mobil tidak mungkin dibuat dari besi tuang?
c. Mengapa besi tuang putih sangat getas?
d. Apakah jenis besi tuang yang Anda pilih untuk membuat blok mesin mobil? Mengapa? Jelaskan dengan terperinci.

8. Gambar berikut ini adalah sebuah bis kuning Universitas Indonesia (UI).
- Jelaskan jenis baja yang digunakan sebagai bodi/badan bus. Jelaskan spesifikasi baja tersebut dengan terperinci.
 - Apakah baja yang digunakan tersebut sama dengan baja yang digunakan pada bodi mobil Kijang Inova? Mengapa?



Sumber: Diadaptasi dari <http://vokasi.ui.ac.id/web/bis-kuning/>.

- Jelaskan proses manufaktur bodi bus tersebut.
 - Jika bus mengalami tabrakan dengan sepeda motor di dalam kampus maka bagian badan yang tertabrak akan penyok. Mengapa bisa penyok? Jelaskan.
 - Mengapa baja cenderung terkorosi? Jelaskan bagaimana cara kerja cat dalam menurunkan laju korosi.
9. Gambar berikut ini adalah salah satu mobil komersial kelas menengah di Indonesia.
- Jelaskan jenis baja yang digunakan untuk membuat bodi mobil tersebut. Mengapa? Jelaskan jawaban Anda.
 - Jelaskan mikrostruktur material bodi mobil tersebut, termasuk jelaskan tentang fasa-fasa yang terdapat di dalamnya.



Sumber: Diadaptasi dari www.suzuki.co.id/automobile.

SIFAT, APLIKASI, DAN PEMROSESAN LOGAM NON-FERO

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

1. Menjelaskan karakteristik logam-logam non-fero.
2. Menjelaskan proses pembuatan logam-logam non-fero, mulai dari bijih hingga menjadi barang jadi.
3. Memahami klasifikasi logam-logam non-fero.
4. Memahami pemakaian logam-logam non-fero dalam kehidupan sehari-hari.

5.1 Aluminium

Karakteristik Aluminium

Aluminium merupakan logam yang paling banyak digunakan setelah baja. Karakteristik utamanya adalah ringan (berat jenis = $2,7 \text{ g/cm}^3$), memiliki konduktivitas panas dan listrik yang tinggi, memiliki ketahanan korosi yang baik dalam atmosfer biasa, serta memiliki keuletan yang cukup tinggi. Aluminium jauh lebih ringan jika dibandingkan dengan baja (berat jenis = $7,8 \text{ g/cm}^3$). Salah satu kelemahan utama aluminium adalah titik leburnya yang relatif rendah, hanya 660°C . Titik lebur baja jauh lebih tinggi, yaitu sekitar 1.500°C .

Dalam industri otomotif, penggunaan aluminium menempati urutan kedua setelah besi dan baja, baik dalam bentuk produk pengecoran (*cast product*) maupun dalam bentuk produk penempaan (*wrought product*). Hal ini disebabkan aluminium merupakan logam non-fero yang ringan, serta memiliki sifat mekanis yang baik dan mudah dibentuk.

Lebih dari 80% produk aluminium pada industri manufaktur dihasilkan dengan metode pengecoran. Hal ini dikarenakan aluminium dapat dengan mudah dikombinasikan dengan unsur lain (*alloying*) untuk mengatur karakteristik, seperti sifat mekanis, sifat mampu cor, sifat mampu mesin (*machinability*), *surface finish*, ketahanan korosi, konduktivitas panas dan listrik, sifat mampu las (*weldability*), serta ketahanan terhadap hot tear (*hot tear resistance*). Kualitas dari produk hasil pengecoran tersebut masih dapat ditingkatkan dengan metode modifikasi, penghalusan butir, dan perlakuan panas.

Proses Pembuatan Aluminium

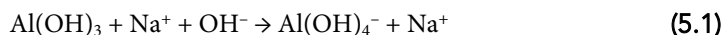
Tahapan proses pembuatan aluminium, mulai dari bijih menjadi aluminium batangan dapat dilihat pada Gambar 5.1. Bijih aluminium dikenal dengan nama bauksit yang mengisi sekitar 8% dari kerak bumi. Bauksit merupakan oksida dari aluminium dan terdapat dalam dua bentuk, yaitu

1. *carstic bauxite*, yang sebagian besar terdiri atas alumina monohidrat ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).
2. *lateritic bauxite*, yang sebagian besar terdiri atas alumina trihidrat ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

Kandungan bauksit adalah 20–50% alumina (Al_2O_3), 2–28% besi, 12–30% air, dan 1–8% asam silikat. Warna bauksit bisa merah, putih, dan kuning (bergantung pada *impurities* yang dikandung). Tempat temuan utama bauksit adalah di wilayah Eropa (Prancis, Italia, Rusia, Hungaria, negara-negara Balkan). Tempat temuan bauksit lainnya terdapat di Asia, Australia, Afrika, dan Amerika. Di Indonesia, deposit bauksit banyak ditemukan di Pulau Bintan, Bangka, Belitung, Kalimantan Barat dan Kalimantan Tengah.

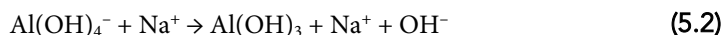
Proses Bayer

Pada bauksit yang telah dimurnikan, kandungan aluminanya naik menjadi sekitar 40–55%. Bauksit tersebut kemudian diolah untuk menjadi alumina murni melalui **proses Bayer**. Secara skematis, tahapan proses Bayer dapat dilihat pada Gambar 5.2. *Tahap pertama* adalah tahap ekstraksi di mana bauksit dihancurkan dan dimasukkan ke dalam autoklaf dan dilarutkan dengan NaOH menjadi natrium aluminat. Reaksi yang terjadi pada tekanan tinggi dan temperatur 110–270°C sesuai dengan persamaan berikut.



Pada tahap ini, bauksit yang tidak terlarut akan mengendap sebagai residu. Selain itu, silikon yang dikandung bauksit akan mengendap sebagai Na-Al-silikat, serta oksida besi dan titanium akan mengendap sebagai padatan. Endapan-endapan ini harus dipisahkan dari larutan natrium aluminat melalui proses pengendapan (*settling*). Kemudian, larutan disaring dan dipindahkan ke tangki pengendapan. Lumpur endapan dicuci untuk memperoleh kembali NaOH dan kemudian didaur ulang ke awal proses.

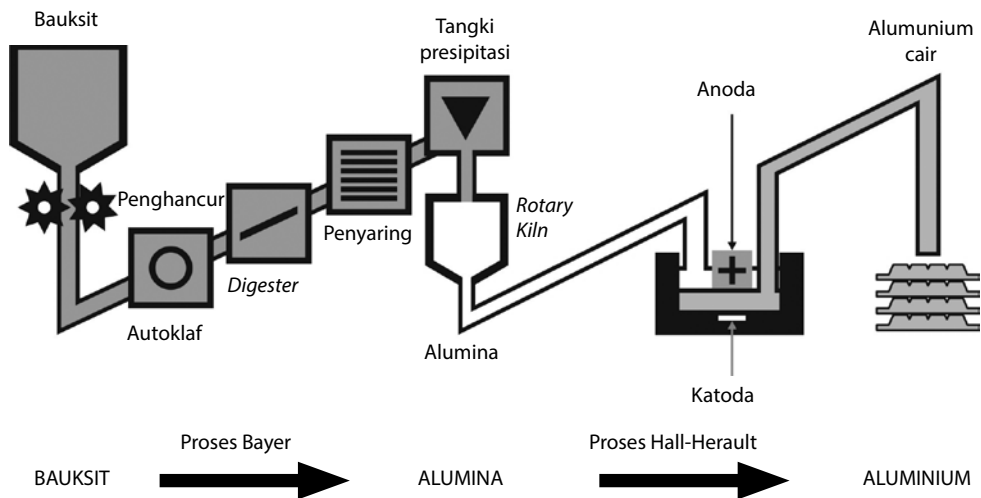
Tahap kedua adalah proses pengendapan, di mana alumina hidrat diendapkan dari larutan natrium aluminat melalui reaksi sesuai dengan persamaan berikut.



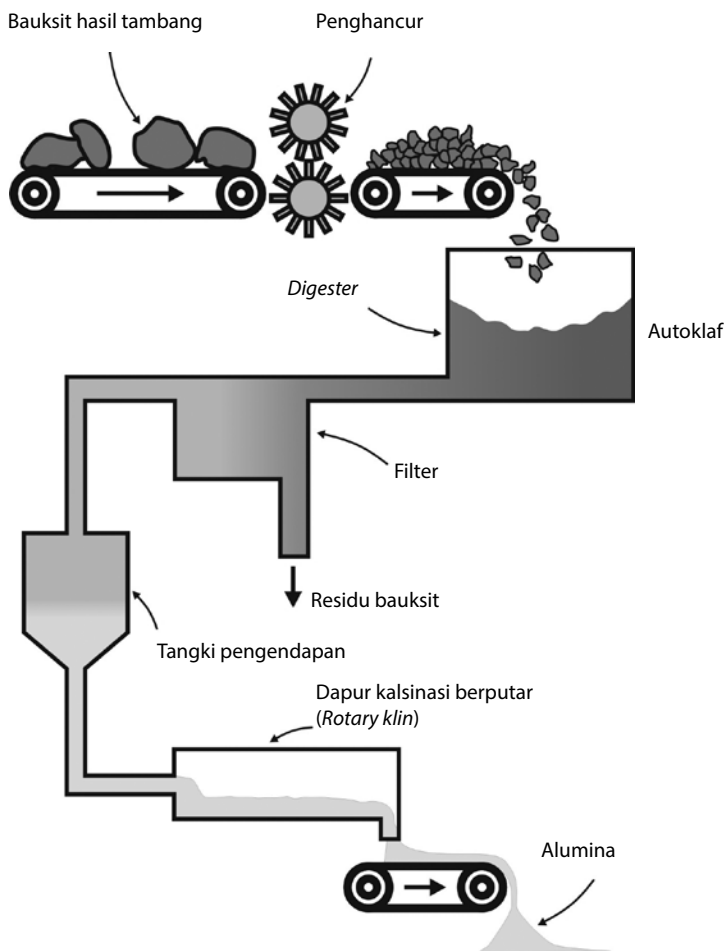
Pada dasarnya, reaksi ini adalah kebalikan dari reaksi pada tahap pertama, di mana alumina hidrat diendapkan secara terkontrol melalui proses pembenihan (*seeding* atau *selective nucleation*). Hasil dari tahap ini berupa kristal alumina hidrat yang ukuran kristalnya kemudian diseleksi dan dimasukkan ke dalam dapur kalsinasi (*rotary* atau *fluidised bed*). Kristal yang berukuran terlalu kecil di daur ulang ke awal proses.

Tahap ketiga adalah proses kalsinasi di mana molekul air dari alumina hidrat diuapkan melalui proses kalsinasi, sesuai dengan persamaan berikut.





GAMBAR 5.1 Alur proses pengolahan aluminium, mulai dari bijih bauksit hingga menjadi batangan aluminium.



GAMBAR 5.2 Tahapan proses Bayer, untuk mengolah bauksit menjadi alumina murni.

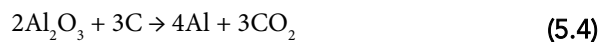
Hasil akhir dari proses Bayer ini adalah alumina murni. Ada dua jenis alumina yang dapat dihasilkan dari proses Bayer, yaitu:

1. **Chemical Grade Alumina** (CGA), yang dapat berupa aluminium hidroksida atau alumina, sebagai bahan baku untuk pembuatan batu tahan api, abrasif, layer LCD, cat, deterjen, dan lain-lain. Proses kalsinasi untuk menghasilkan CGA di atas 1.100°C.
2. **Smelter Grade Alumina** (SGA), yang merupakan bahan baku proses Hall-Heroult untuk diolah menjadi aluminium. Proses kalsinasi untuk menghasilkan SGA dilakukan pada temperatur 900 – 1.100°C.

Indonesia telah memiliki pabrik CGA di Tayan, Kalimantan Barat, yaitu PT. Indonesia Chemical Alumina (ICA) dengan kapasitas produksi 300.000 ton per tahun. PT. ICA merupakan perusahaan patungan antara PT. ANTAM (sebuah BUMN) dengan Showa Denko K.K., Jepang. Sementara pabrik SGA terdapat di Kandawangan, Kalimantan Barat, yaitu PT. Well Harvest Winning, dengan kapasitas 1 juta ton per tahun.

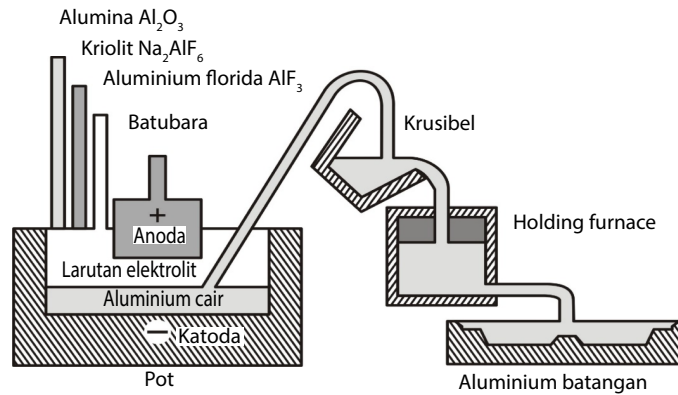
Proses Hall-Heroult

Pada prinsipnya, proses Hall-Heroult mengubah alumina menjadi aluminium murni melalui proses elektrolisis, yang secara skematis digambarkan pada Gambar 5.3. Alumina dilarutkan dalam elektrolit lelehan kriolit (Na_3AlF_6) dan dimasukkan ke dalam tangki elektrolisis (biasa disebut “pot”), di mana terbuat dari baja yang dilapis dengan grafit. Listrik bertegangan rendah (4–5 V), tetapi dengan arus tinggi (50.000–280.000 A), dialirkan ke dalam pot melalui anoda karbon (positif)—yang terbuat dari batu bara—dan katoda karbon (negatif)—yang berupa lapisan grafit pada pot baja. Reaksi yang terjadi adalah proses reduksi aluminium di dalam larutan elektrolit menjadi aluminium murni yang mengendap di katoda, sesuai dengan persamaan berikut.

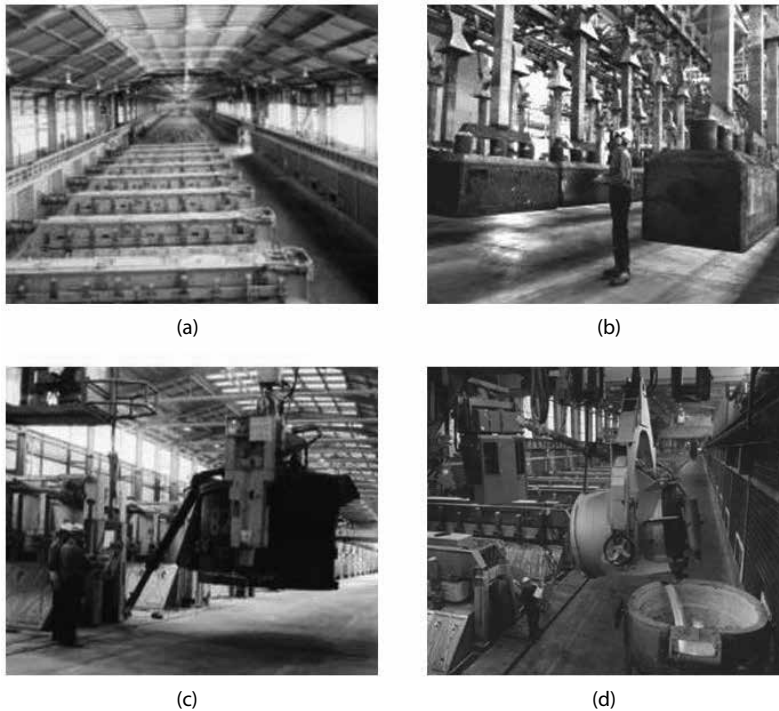


Aluminium yang diendapkan di bagian bawah pot dihisap (*shiponed-off*) secara berkala dan dibawa ke dapur (*holding furnace*) untuk kemudian dicor ke dalam cetakan. Pada umumnya, sebuah pabrik aluminium (disebut *aluminium smelter*) memiliki 300 buah pot yang dapat memproduksi 125.000 ton aluminium setiap tahun (Gambar 5.4). Proses ini memerlukan energi listrik yang sangat besar, yaitu sekitar 15,7 kWh per kilogram aluminium. Oleh karena itu, lokasi pabrik biasanya berdekatan dengan pembangkit listrik. PT Inalum merupakan satu-satunya *aluminium smelter* primer di Indonesia, yang berlokasi di Asahan, Sumatra Utara, dan berdampingan dengan PLTA Sigura-Gura sebagai pemasok listriknya. Berikut ini adalah dua jenis aluminium yang dapat dihasilkan melalui proses tersebut.

1. *Commercial purity aluminium*: 99,0–99,8% Al.
2. *Super purity aluminium*: $\geq 99,99\%$ Al.



GAMBAR 5.3 Ilustrasi skematis proses Hall-Heroult.



GAMBAR 5.4 (a) Potline pada aluminium smelter yang dapat menghasilkan 200.000 ton aluminium per tahun, (b) anoda karbon yang terbuat dari batu bara, (c) proses penghisapan cairan aluminium cair dari pot, (d) penuangan aluminium cair ke dalam holding furnace.

Sistem Penamaan Aluminium Paduan

Berdasarkan standar *Aluminium Association (AA)*, paduan aluminium diklasifikasikan menjadi dua kelas utama, yaitu aluminium tuang (*cast aluminium*) dan aluminium pengerjaan (*wrought aluminium*). Penamaan kedua kelas aluminium tersebut bergantung pada unsur paduan utama yang dikandungnya.

Sistem penamaan untuk **paduan aluminium tuang** menggunakan sistem registrasi dengan tiga angka, diurutkan berdasarkan unsur paduannya (seperti yang dijelaskan pada Tabel 5.1). Tidak terdapat sistem penamaan paduan aluminium pada seri 6XX dan 9XX. Angka pertama menunjukkan kelompok paduan. Angka kedua dan ketiga menunjukkan jenis spesifikasi komposisi aluminium paduan tersebut. Sering kali, angka keempat yang menunjukkan bentuk produk diberikan, 0 untuk spesifikasi coran, 1 untuk spesifikasi batangan, dan 2 untuk spesifikasi batangan yang lebih sempit. Sebagai contoh, XXX.0 mewakili batasan komposisi kimia dari paduan hasil proses pengecoran, sedangkan untuk XXX.1 dan XXX.2 mewakili batasan komposisi kimia dari batangan.

Sistem penamaan pada **paduan aluminium hasil pengerjaan** menggunakan sistem registrasi empat angka, dengan angka pertama menunjukkan unsur paduan utama pada paduan aluminium tersebut (seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.1).

TABEL 5.1 Sistem penamaan paduan aluminium berdasarkan Aluminium Association (AA).

Aluminium Tuang		Aluminium Pengerjaan	
Seri	Unsur Paduan	Seri	Unsur Paduan
1XX	99,0% min. Al	1XXX	99,0% min. Al
2XX	Al-Cu	2XXX	Cu
3XX	Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Mg	3XXX	Mn
4XX	Al-Si	4XXX	Si
5XX	Al-Mg	5XXX	Mg
6XX	Tidak digunakan	6XXX	Mg dan Si
7XX	Al-Zn	7XXX	Zn
8XX	Al-Sn	8XXX	Selain unsur di atas
9XX	Selain unsur di atas	9XXX	Tidak digunakan

Pada seri 1XXX, dua angka terakhir menunjukkan jumlah kadar minimum aluminium pada paduan dalam 99,00%. Sementara pada seri 2XXX hingga 8XXX, dua angka terakhir menunjukkan kandungan unsur paduan utama.

Aplikasi Paduan Aluminium

Paduan Aluminium untuk Transportasi

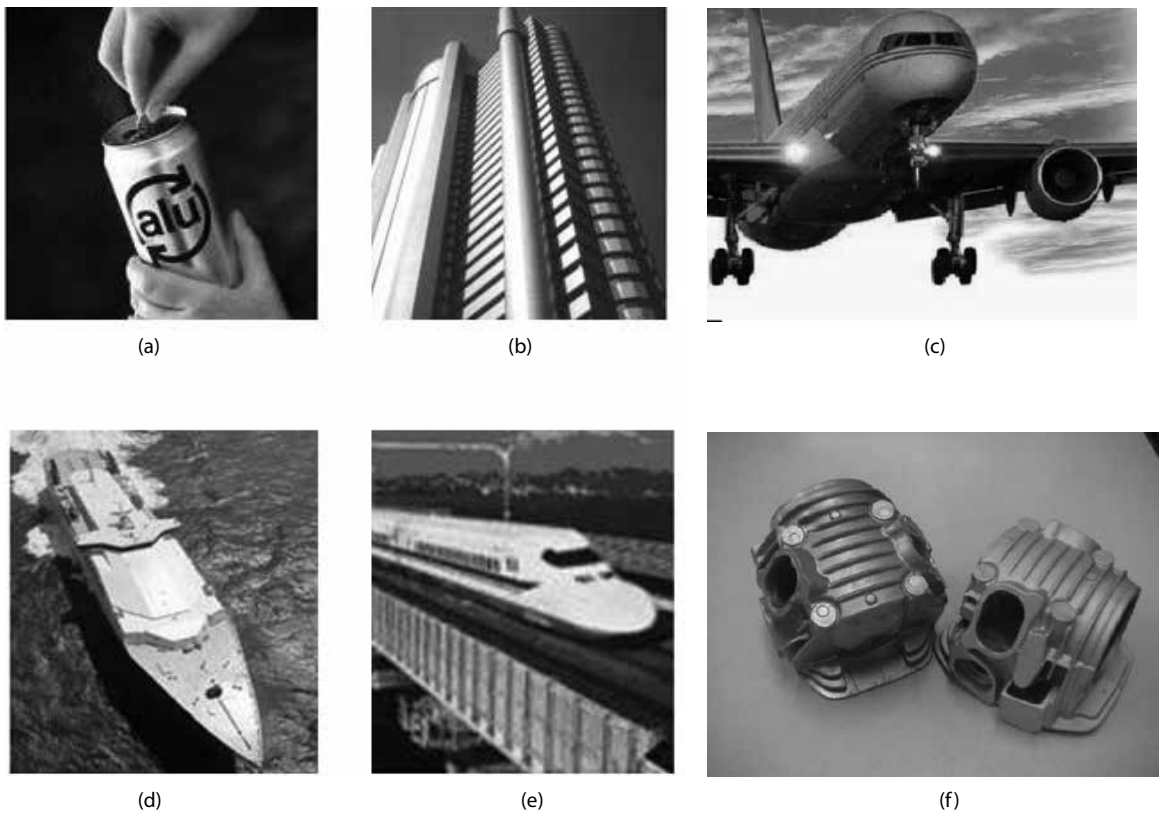
Dalam dunia otomotif, aluminium banyak dipakai sebagai bodi mobil dan mesin. Paduan aluminium untuk mesin sebagian besar adalah seri 3XX, Al-Si-Cu, yang memiliki kemampuan cor sangat baik, kekerasan yang tinggi, dan dapat "dilakupanaskan". Untuk aplikasi pesawat terbang, salah satu paduan aluminium yang populer digunakan adalah duralumin (Al - 4% Cu - 0,5% Mg - 0,5% Mn). Paduan ini memiliki kekerasan tinggi, namun ketahanan korosinya rendah, sehingga perlu dilapisi lagi dengan lembaran aluminium murni, yang sering disebut sebagai aluminium cladding. Duralumin adalah material yang digunakan oleh Wright bersaudara untuk membuat badan pesawat terbang hasil temuannya. Sementara itu, sebagian besar kereta ringan terbuat dari aluminium, seperti halnya pada badan kapal supercepat (seacat), yang bertujuan untuk mengurangi berat secara signifikan dan tahan korosi (Gambar 5.5).

Paduan Aluminium untuk Pembungkus

Aluminium murni untuk pembungkus—*packaging*—dibuat dalam bentuk lembaran tipis (*foil*). Sebagai kaleng minuman, aluminium juga sangat populer (Gambar 5.5). Aluminium yang dipakai untuk tujuan ini biasanya dibuat dari seri 5XXX, Al-Mg, yang relatif ulet, namun memiliki kemampuan pengerasan regang yang tinggi.

Paduan Aluminium untuk Konstruksi

Paduan aluminium yang tidak korosif menyebabkan pemakaiannya untuk aplikasi konstruksi relatif yang tidak memerlukan biaya perawatan. Aplikasi aluminium bervariasi mulai dari rangka jendela, rangka pintu, rangka atap, tirai, atap, dan lain-lain. Sebagian besar aluminium konstruksi terbuat dari seri 3XXX (Gambar 5.5).



GAMBAR 5.5 Beberapa aplikasi paduan aluminium (a) kaleng minuman, (b) konstruksi bangunan, (c) bodi pesawat terbang, (d) bodi kapal supercepat, (e) bodi kereta ringan, (f) bagian mesin kendaraan bermotor roda dua.

5.2 Tembaga

Karakteristik Tembaga

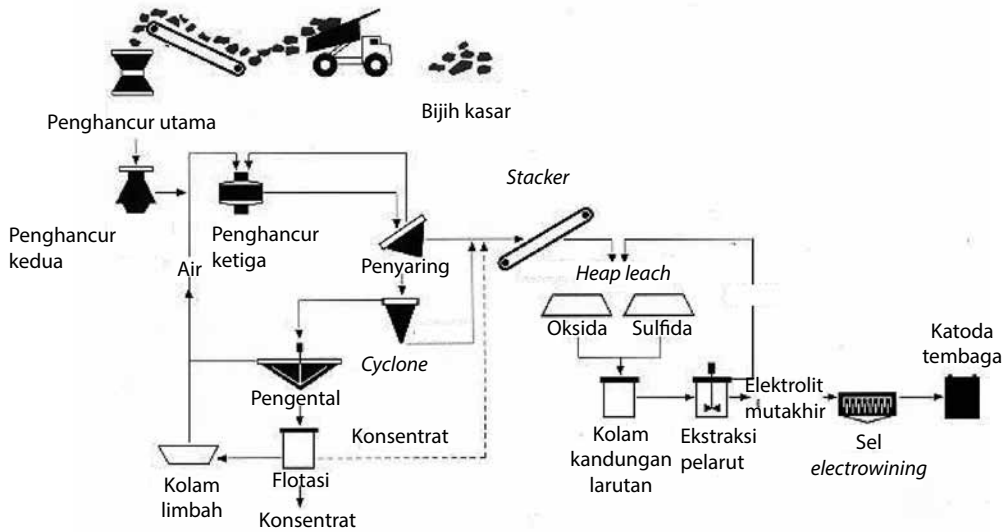
Tembaga merupakan logam yang khusus dan sangat bermanfaat dalam kehidupan sehari-hari. Logam ini berbeda dengan logam-logam lainnya, terutama dalam hal konduktivitas listrik. Dalam tingkatan volume yang sama, tembaga memiliki konduktivitas listrik paling tinggi jika dibandingkan dengan logam lain, kecuali perak murni. Selain itu, tembaga juga memiliki sifat yang baik dalam hal konduktivitas panas, ketahanan korosi, pengubahan bentuk, dan penyambungan. Namun di sisi lain, tembaga dan paduannya adalah logam yang memiliki kekuatan rendah. Beberapa paduan tembaga juga rentan terhadap korosi retak tegang, kecuali jika perlakuan lepas tegang. Titik lebur tembaga adalah 1.085°C . Logam ini memiliki struktur kristal FCC, dan sama sekali tidak tertarik oleh magnet (bersifat diamagnetik).

Warna asli dari tembaga adalah kemerahmudaan, tetapi kita lebih sering melihatnya berwarna coklat dan kehijauan dalam kehidupan sehari-hari. Hal tersebut karena keberadaan lapisan oksida pada permukaannya. Serupa dengan aluminium, tembaga dan paduannya akan membentuk lapisan tipis CuO yang berwarna gelap jika beraksi dengan oksigen. Lapisan tersebut tahan terhadap korosi, sekaligus melindungi bagian di bawahnya dari korosi lebih lanjut. Seiring berjalannya waktu, warna tembaga akan menjadi biru kehijauan akibat terbentuknya lapisan tipis $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ hasil reaksi dengan CO_2 di udara. Namun pada kebanyakan lingkungan terutama pada atmosfer biasa, tembaga dan paduannya akan mengalami perubahan warna menjadi biru kehijauan. Penambahan lapisan pernis pada permukaan dapat membantu memelihara warna asli tembaga dan paduannya.

Tembaga memiliki keuletan dan kelunakan yang tinggi. Oleh karena itu, perlakuan lain harus diberikan untuk mendapatkan kekerasan tembaga. Sebagian besar paduan tembaga tidak bisa dikeraskan dengan perlakuan panas. Dengan demikian, pengerjaan dingin dan pepaduan menjadi pilihan yang mutlak untuk digunakan. Kelunakan yang tinggi juga dapat membuat tembaga sulit untuk "dimesin".

Proses Pengolahan Tembaga

Bijih tembaga di alam terbagi menjadi tiga jenis, yaitu dalam bentuk sulfida, oksida, atau karbonat. Contoh bijih sulfida adalah kalkopirit (CuFeS_2), bornit (Cu_5FeS_4), kovelit (CuS), dan kalkosit (Cu_2S). Sementara itu, contoh bijih oksida adalah kuprit (Cu_2O). Bijih sulfida diekstraksi dengan metode flotasi, sedangkan bijih oksida umumnya diekstraksi dengan menggunakan metode pelelehan. Bijih tembaga yang terdapat di Papua adalah kalkopirit (CuFeS_2). Ilustrasi proses pengolahan tembaga dari bijih sampai menjadi logam tembaga ditunjukkan oleh Gambar 5.6. Bijih tembaga yang berasal dari tambang diangkut dan dimasukkan ke dalam penghancur utama. Kemudian, bijih tersebut dihancurkan dan diayak menjadi bijih tembaga dengan ukuran $\sim 0,5$ mm. Bijih tembaga halus tersebut kemudian dimasukkan ke



GAMBAR 5.6 Proses pengolahan bijih tembaga hingga menjadi tembaga murni.

dalam tangki flotasi untuk memperoleh tembaga murni. Bijih yang masih kasar akan dilakukan proses pelelehan, di mana larutan asam *sulfur* diberikan untuk melarutkan tembaga. Selanjutnya, larutan yang mengandung tembaga terlarut akan melalui proses *electrowining* untuk memperoleh tembaga murni.

Sistem Penamaan Paduan Tembaga

Penamaan paduan tembaga ditentukan melalui sistem penamaan UNS (*Unified Numbering System*) yang dibuat oleh ASTM (*American Society for Testing and Materials*)—perhatikan Tabel 5.2 dan Tabel 5.3. Sistem tersebut membagi paduan tembaga menjadi dua golongan, yaitu **tembaga pengerjaan** dan **tembaga tuang**. Penamaan yang diberikan menggunakan lima digit dan diawali dengan huruf C. Perbedaan antara tembaga pengerjaan dan tembaga tuang dapat dilihat dari digitnya. Tembaga dengan nomor C10000 hingga C79999 merupakan tembaga pengerjaan, sedangkan nomor C80000 hingga C99999 merupakan tembaga tuang.

Aplikasi Tembaga dan Paduannya

Dari zaman dahulu hingga sekarang, tembaga memainkan peranan besar dalam kehidupan umat manusia. Gambar 5.7 menunjukkan beberapa aplikasi tembaga. Zaman dahulu, manusia menggunakan tembaga sebagai senjata dan peralatan rumah tangga. Kini, manusia lebih banyak menggunakan tembaga untuk aplikasi elektronik, seperti kabel,

dinamo, radio, dan televisi. Karena bersifat sebagai penghantar panas yang baik, tembaga juga digunakan sebagai radiator kendaraan bermotor, pendingin ruangan, dan alat penghangat ruangan. Ketahanan korosi yang dimiliki tembaga menjadikannya sebagai salah satu material pilihan pada bidang konstruksi, khususnya untuk pipa dan atap.

TABEL 5.2 Sistem penamaan tembaga pengerjaan berdasarkan UNS (Unified Numbering System).

Nama Umum		Kandungan Utama	Sistem Tata Nama UNS
Tembaga		≥ 99,3% Cu	C10100...C15999
Paduan tembaga tinggi		> 96% Cu, tetapi < 99,3% Cu	C16000...C19999
Kuningan	Kuningan kuning	Cu-Zn	C21000...C28999
	Kuningan timbal	Cu-Zn-Pb	C30000...C39999
	Kuningan timah putih	Cu-Zn-Sn-Pb	C40000...C49999
Perunggu	Perunggu fosfor	Cu-Sn-P	C50000...C52999
	Perunggu fosfor timbal	Cu-Sn-Pb-P	C53000...C54999
	Paduan tembaga-fosfor	Cu-P, Cu-P-Ag	C55000...C55299
	Paduan tembaga-perak-seng	Cu-Ag-Zn	C55300...C60799
	Perunggu aluminium	Cu-Al-Ni-Fe-Si-Sn	C60800...C64699
	Perunggu silikon dan kuningan silikon	Cu-Si-Sn	C64700...C66199
	Paduan tembaga-seng lainnya	Cu-Zn-...	C66200...C69999
Tembaga-nikel (paduan tembaga-nikel-besi)		Cu-Ni-Fe	C70000...C73499
Perunggu spinodal		Cu-Ni-Sn	
Nikel perak		Cu-Ni-Zn	C73500...C79999

TABEL 5.3 Sistem penamaan tembaga tuang berdasarkan UNS (Unified Numbering System).

Nama Umum		Kandungan Utama	Sistem Tata Nama UNS
Tembaga		≥ 99,3% Cu	C80000...C81399
Paduan tembaga tinggi		> 96% Cu, tetapi < 99,3% Cu	C81400...C83299
Kuningan	Kuningan merah dan kuningan merah timbal	Cu-Sn-Zn Cu-Sn-Zn-Pb	C83300...C84999
	Kuningan kuning	Cu-Zn	C85000...C85999
Perunggu	Perunggu mangan dan perunggu mangan timbal	Cu-Zn-Mn-Fe-Pb	C86000...C86999
	Perunggu silikon dan kuningan silikon	Cu-Zn-Si	C87000...C87999
	Tembaga-bismut	Cu-Bi	C88000...C89999
	Paduan tembaga-bismut-selenium	Cu-Bi-Se	C90000...C94500
	Perunggu timah	Cu-Sn-Zn	C90000...C94500
	Perunggu timah timbal	Cu-Sn-Zn-Pb	C94600...C94999
	Perunggu nikel-timah	Cu-Ni-Sn-Zn-Pb	C94600...C94999
Tembaga nikel (paduan tembaga-nikel-besi)	Perunggu aluminium	Cu-Al-Ni-Fe	C95000...C95999
		Cu-Ni-Fe	C96000...C96999
Perunggu spinodal		Cu-Ni-Sn	
Nikel perak		Cu-Ni-Zn-Pb-Sn	C97000...C97999
Paduan tembaga-timbal		Cu-Pb	C98000...C98999
Paduan khusus		Cu-...	C99000...C99999

5.3 Magnesium

Karakteristik Magnesium

Magnesium merupakan logam rekayasa paling ringan di dunia. Dengan berat jenis 1.740 kg/m^3 dan dalam satu volume yang sama, berat magnesium hanya dua pertiga dari aluminium atau seperempat kali baja. Selain itu, logam yang memiliki warna putih keperakan ini adalah logam yang sangat aktif secara kimia. Serbuk magnesium yang berukuran halus dapat terbakar di udara dan menghasilkan nyala putih. Pembakaran terjadi akibat reaksi magnesium dengan nitrogen atau karbon dioksida. Ketahanan korosi magnesium pada atmosfer biasa tergolong cukup baik, tetapi tidak cukup baik pada atmosfer laut. Di udara yang cukup lembab, magnesium akan membentuk lapisan protektif magnesium karbonat ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$) pada bagian permukaannya. Pada temperatur ruang, magnesium merupakan logam yang sulit diubah bentuknya, tetapi cukup lunak. Oleh karena itu, produk magnesium lebih banyak dibuat dengan proses pengecoran atau proses pengerjaan panas pada temperatur sekitar $200\text{--}350^\circ\text{C}$.



(a)



(b)



(c)



(d)

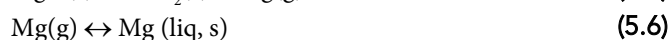
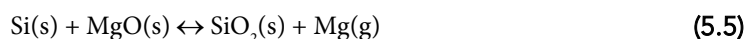
GAMBAR 5.7 Beberapa aplikasi tembaga, (a) kawat, (b) pipa, (c) atap bangunan, (d) patung Liberty.

Karena kereaktifannya di alam, magnesium hanya dapat ditemukan dalam bentuk senyawanya. Persenyawaan magnesium tersebut dapat berupa magnesit, dolomit, dan magnesium hidroksida. Magnesit atau MgCO_3 merupakan persenyawaan yang paling umum untuk diekstraksi menjadi logam magnesium. Magnesit mengandung 47,8% magnesium oksida dan 52,2% karbon dioksida. Namun terkadang, kalsium karbonat dan besi karbonat juga terkandung dalam magnesium.

Proses Pengolahan Magnesium

Proses Silikotermik

Proses ini juga dikenal sebagai *Pidgeon*, *Magnetherm*, atau *Bolzano*. Sebelum proses silikotermik dilakukan, bijih magnesium harus sudah diolah menjadi bentuk konsentrasinya. Selanjutnya, konsentrat MgCO_3 melalui proses kalsinasi hingga menjadi magnesium oksida (MgO). Proses silikotermik dilakukan dengan memberikan panas secara terus-menerus pada tekanan gas yang rendah, dengan menggunakan ferrosilikon, sehingga magnesium oksida cair berkurang secara bertahap. Proses tersebut dilakukan pada temperatur sekitar 1.400°C . Secara umum, reaksi dari proses tersebut adalah sebagai berikut.



Magnesium yang terbentuk akan menguap dan terkondensasi jauh dari daerah yang panas. Magnesium terkondensasi ini memiliki kemurnian sekitar 99,95%. Selanjutnya, proses yang tertinggal adalah melebur magnesium tersebut dan membentuknya menjadi produk melalui metode pengecoran.

Proses Elektrolitik

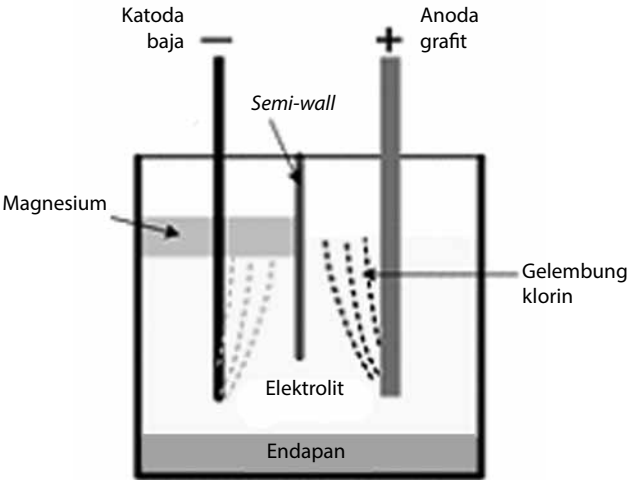
Sebelum proses elektrolitik dilakukan, magnesium oksida harus diubah menjadi magnesium klorida melalui proses klorinasi atau disebut pula proses *Farben*. Selanjutnya, magnesium klorida akan dimasukkan ke dalam sel elektrolisis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.8. Pada gambar tersebut, grafit bertindak sebagai anoda, sedangkan baja sebagai katodanya. Elektrolit yang digunakan adalah alkalin klorida dan magnesium klorida. Temperatur yang digunakan adalah $680\text{--}750^\circ\text{C}$. Dalam kondisi ini, magnesium klorida akan terdekomposisi menjadi logam magnesium dan gas klorin sesuai reaksi dalam persamaan berikut.



Magnesium yang terbentuk pada katoda akan terangkat ke atas permukaan (lebih ringan dari elektrolit) dan ditampung pada ruang penampungan katoda. Sementara itu, gas klorin yang dihasilkan di anoda akan ditampung pada ruang penampungan anoda.

Sistem Penamaan Magnesium

Sistem penamaan magnesium yang umum dibuat oleh ASTM. Sistem ini menggunakan kombinasi huruf dan angka untuk mengidentifikasi jenis paduan yang ada pada paduan tersebut. Dua huruf pertama menandakan unsur paduan utama dengan kode yang sudah ditetapkan. Kode huruf penanda unsur paduan magnesium dapat dilihat pada Tabel 5.4. Dua huruf tadi kemudian diikuti oleh dua angka. Dua angka tersebut mengindikasikan



GAMBAR 5.8 Proses elektrolitik untuk memproduksi magnesium.
Sumber: Diadaptasi dari www.subtech.com.

TABEL 5.4 Kode huruf penanda unsur paduan utama pada paduan magnesium.

Simbol	Unsur Paduan	Simbol	Unsur Paduan
A	Aluminium	M	Mangan
B	Bismuth	N	Nikel
C	Tembaga	P	Timbal
D	Kadmium	Q	Arsenik
E	Logam tanah jarang	R	Kromium
F	Besi	S	Silikon
H	Torium	T	Timah
K	Zirkonium	Z	Seng
L	Berilium		

TABEL 5.5 Kode perlakuan panas pada paduan magnesium.

Simbol	Arti
F	Hasil permesinan
O	Hasil anil
H	Hasil pengerasan regang
T4	Hasil perlakuan-pelarutan
T5	Hasil penuaan buatan
T6	Hasil perlakuan-pelarutan diikuti penuaan buatan

kandungan unsur-unsur paduan yang dikodekan pada dua huruf sebelumnya. Huruf kelima merupakan penjelasan modifikasinya. Tanda "setrip" diberikan setelah huruf kelima dilanjutkan dengan kode yang sesuai dengan jenis perlakuan panas yang dialami paduan tersebut. Kode perlakuan panas pada paduan magnesium dapat dilihat pada Tabel 5.5. Untuk lebih jelasnya, kita ambil contoh paduan ZE63A-T6. Paduan magnesium ini mengandung paduan utama seng sebesar 6% dan logam tanah jarang sebesar 3%. Selanjutnya, simbol A merupakan modifikasi paduannya, sedangkan T6 menandakan bahwa paduan telah mengalami perlakuan T6.

Aplikasi Magnesium dan Paduannya

Magnesium adalah logam yang relatif mahal sehingga logam ini lebih jarang digunakan untuk material konstruksi jika dibandingkan dengan aluminium dan baja. Namun untuk aplikasi-aplikasi tertentu, pemakaian magnesium lebih disukai. Aplikasi-aplikasi magnesium dapat dilihat pada Gambar 5.9. Dalam memproduksi baja, logam nonfero, kaca, dan semen, magnesium oksida (MgO) sering digunakan sebagai material refraktori yang tahan temperatur tinggi. Magnesium juga sering digunakan bersama aluminium sebagai material paduan untuk membuat kaleng minuman. Selain itu, magnesium juga dipakai sebagai anoda korban untuk melindungi pipa, tangki, dan struktur-struktur yang terkubur di bawah tanah. Dalam bidang militer, penyalat api yang terbuat dari magnesium dapat digunakan untuk membuat api pada kondisi bertahan hidup (*survival*).



(a)



(b)



(c)



(d)

GAMBAR 5.9 Beberapa aplikasi magnesium: (a) MgO digunakan untuk pelapis dinding dapur pembakaran; (b) paduan Al-Mg digunakan untuk pembuat kaleng minuman; (c) anoda korban magnesium; (d) penyalat api magnesium yang dapat menyala jika digesekkan dengan pisau.

5.4 Titanium

Karakteristik Titanium

Dalam keadaan murni, titanium adalah logam yang cerah dan berwarna putih. Logam ini adalah logam yang ringan. Berat jenis titanium adalah $4,5 \text{ g/cm}^3$, 40% lebih ringan daripada baja dan 60% lebih berat dari aluminium. Titanium juga memiliki ketahanan korosi yang baik. Ketahanan korosi yang baik disebabkan karena kemampuan logam ini untuk membentuk lapisan pasif di permukaannya, yang mencegah korosi lebih lanjut. Ketahanan yang baik juga ditunjukkan titanium terhadap sulfur, larutan klorin, gas klorin, dan berbagai asam organik.

Titanium merupakan logam yang kuat. Dalam keadaan murni, kekuatan luluhnya bisa mencapai 241 MPa dengan elongasi sebesar 55%. Titik lebur logam ini adalah 1.677°C . Selain itu, titanium bukanlah penghantar listrik yang baik, jika dibandingkan dengan tembaga, daya hantar listrik titanium hanya 3,1%-nya saja. Sifat kemagnetan titanium juga kurang baik sehingga logam ini digolongkan sebagai logam para-magnetik.

Dalam bidang pengelasan, titanium tergolong sulit untuk dilas sebab pada temperatur yang tinggi, titanium rentan terhadap hidrogen, oksigen, dan nitrogen yang dapat menyebabkan penggetasan. Untuk itu, pengelasan titanium membutuhkan perlakuan-perlakuan khusus untuk mencegah difusi gas-gas tadi.

Proses Pembuatan Titanium

Titanium menempati urutan kesembilan dalam hal ketersediaan bijihnya di alam. Bijih titanium yang digunakan untuk memproduksi titanium adalah rutil (TiO_2) atau titanium dioksida dan ilmenit (FeTiO_3). Logam titanium diproduksi dengan menggunakan proses Kroll yang dikembangkan oleh seorang ahli metalurgi asal Jerman, William Justin Kroll, pada tahun 1946. Proses tersebut melibatkan konsentrasi atau pemisahan titanium dioksida dari pengotornya termasuk besi oksida. Selanjutnya, titanium dioksida dimasukkan ke dalam reaktor tangki bersama dengan klorin dan batu bara pada temperatur sekitar 900°C . Hasil dari proses ini adalah titanium tetraklorida sesuai reaksi dalam persamaan berikut.



Setelah proses ini, pemurnian kembali dilakukan dengan menggunakan distilasi dan pengendapan untuk memisahkan pengotor dari titanium tetraklorida. Kemudian, ekstraksi titanium dilakukan dengan mereaksikan titanium tetraklorida dengan magnesium pada sebuah tabung baja tahan karat, bertemperatur 1.100°C di bawah atmosfer argon sesuai reaksi dalam persamaan berikut.



Hasil proses ini adalah logam titanium padat berbentuk spons dan magnesium klorida yang berwujud cair. Selanjutnya, logam titanium berbentuk spons tadi dilebur pada dapur yang vakum dan dicetak menjadi batangan.

Jenis-Jenis Paduan Titanium

Titanium murni dapat berstruktur heksagonal yang tersusun padat (HCP) dan dapat pula berstruktur kubus pemusatan ruang (BCC). Pada temperatur di bawah 883°C, titanium akan berstruktur HCP atau biasa disebut α - titanium, sedangkan pada temperatur di atas 883°C, titanium akan berstruktur BCC atau biasa disebut β - titanium. Penambahan unsur paduan pada titanium diketahui dapat menstabilkan fasa α atau β . Aluminium, galium, nitrogen, dan oksigen merupakan unsur paduan penstabil fasa α . Molibdenum, vanadium, tungsten, tantalum, dan silikon merupakan penstabil fasa β .

Berdasarkan komposisi fasanya, titanium diklasifikasikan menjadi empat kelompok, sebagai berikut.

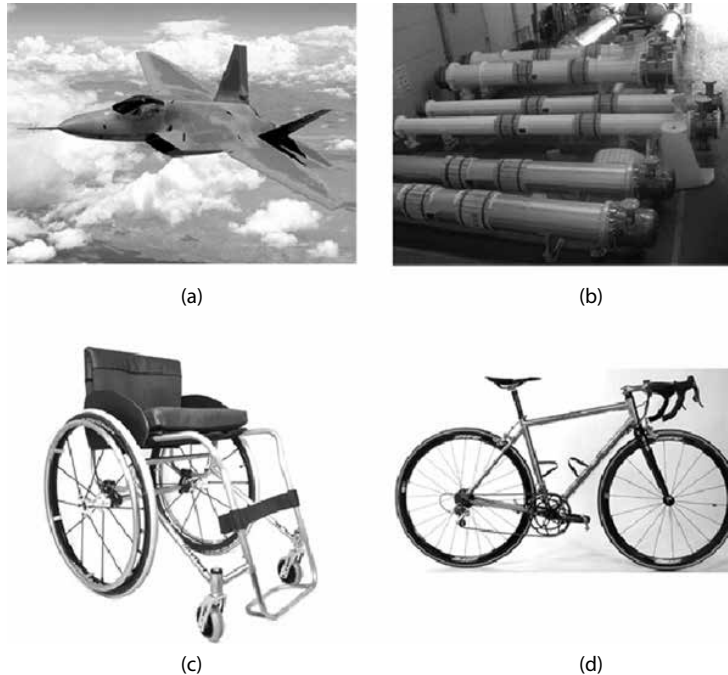
1. Titanium murni dan paduan rendah
2. Paduan alfa
3. Paduan alfa-beta
4. Paduan beta

Titanium murni dan paduan rendah memiliki fasa alfa yang dominan dan fasa beta berbentuk bulat yang tersebar merata di matriks alfa. Selain itu, terdapat pula unsur besi yang berlaku sebagai penstabil fasa beta. Titanium murni memiliki kekuatan yang relatif rendah dan ketahanan korosi yang baik.

Paduan alfa memiliki unsur paduan aluminium dan timah. Paduan alfa secara umum memiliki ketahanan mulur dan ketangguhan yang baik. Paduan ini lebih dipilih untuk aplikasi pada temperatur tinggi. Kemampuan las paduan alfa sangat baik, tetapi kemampuan tempanya lebih buruk jika dibandingkan dengan paduan beta. Sifat ini membuat paduan alfa rentan terhadap cacat-cacat penempaan. Namun demikian, pengurangan reduksi tempa dan pemanasan berulang dapat mengurangi masalah tersebut. Paduan alfa tidak dapat dikuatkan melalui perlakuan panas.

Paduan alfa-beta mengandung 4–6% paduan penstabil fasa beta. Oleh karena itu, fasa paduan ini akan terdiri atas fasa campuran alfa dan beta. Fasa beta pada paduan ini berkisar antara 10–50%. Paduan alfa-beta merupakan paduan yang dapat dilaku panas. Perlakuan panas dilakukan untuk mengontrol jumlah dan morfologi fasa beta. Dengan demikian, paduan ini memiliki kekuatan yang tinggi dan kemampuan pengubahan bentuk pada kondisi panas yang baik. Ketahanan mulur paduan ini lebih rendah jika dibandingkan dengan paduan alfa.

Paduan beta mengandung sejumlah unsur paduan, seperti vanadium, niobium, dan molibdenum yang berfungsi sebagai penstabil fasa beta. Kemampuan tempa paduan ini sangat baik pada berbagai temperatur jika dibandingkan dengan paduan alfa. Kemampukerasan (*hardenability*) paduan ini sangat baik dan mudah diberikan perlakuan panas. Perlakuan panas berupa perlakuan pelarutan diikuti dengan penuaan, dapat membentuk fasa alfa yang halus dan tersebar merata pada fasa beta. Oleh karena itu, paduan ini sangat kuat, tetapi keuletan dan ketahanan fatiknya rendah.



GAMBAR 5.10 Beberapa aplikasi titanium: (a) Pesawat jet, (b) penukar panas, (c) kursi roda, dan (d) rangka sepeda balap.

Sistem penamaan titanium dibuat berdasarkan komposisinya. Sebagai contoh, paduan Ti-5Al-2.5Sn yang memiliki unsur paduan berupa 5% aluminium dan 2,5% timah. Contoh lainnya adalah Ti-6Al-4V yang memiliki unsur paduan berupa 6% aluminium dan 4% vanadium.

Aplikasi Titanium dan Paduannya

Paduan titanium dipilih karena kekuatan, ketahanan fatik, dan ketahanan mulurnya yang sangat baik daripada logam-logam lainnya. Aplikasi titanium dan paduannya dapat dilihat pada Gambar 5.10. Aplikasi titanium yang paling penting adalah aplikasi pada industri penerbangan. Banyak komponen pesawat jet yang menggunakan titanium, misalnya baling-baling mesin, penutup mesin, rangka pesawat, kompresor, dan lain-lain. Titanium juga banyak dipakai untuk instalasi perminyakan lepas pantai, seperti pipa, penukar panas (*heat exchanger*), kondensor, dan komponen-komponen struktural. Dalam dunia kesehatan, titanium dipakai untuk membuat kursi roda, alat bantu dengar, katup jantung, pompa insulin, dan penyambung tulang. Titanium juga banyak digunakan pada bidang olahraga, seperti sepeda, raket tenis, pemukul golf, dan pedang anggar.

5.5 Logam Refraktori

Pendahuluan

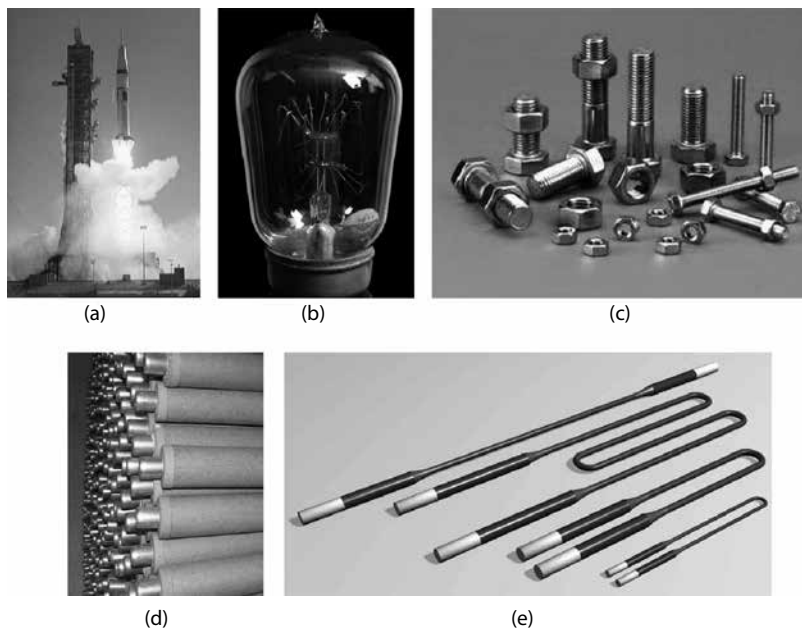
Refraktori merupakan material yang mampu bertahan, serta tidak mengalami pelunakan dan deformasi pada temperatur yang sangat tinggi. Material refraktori yang paling umum

adalah keramik. Keramik mampu bertahan pada temperatur yang sangat tinggi, lebih dari 1.580°C . Tidak hanya keramik yang memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi, beberapa logam pun memiliki karakteristik seperti itu. Logam-logam yang demikian disebut logam refraktori.

Logam refraktori adalah logam yang mampu mempertahankan kekuatannya pada temperatur tinggi. Logam ini memiliki titik lebur yang tinggi sehingga cocok untuk aplikasi-aplikasi yang dioperasikan pada lingkungan bertemperatur tinggi. Aplikasi-aplikasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.11. Kelemahan logam refraktori adalah ketahanan korosi dan oksidasi logamnya cukup buruk. Namun demikian, pemberian lapisan protektif (*coating*) dapat memperbaiki ketahanan korosi dan oksidasi logam ini. Logam-logam yang tergolong sebagai logam refraktori adalah niobium, tantalum, molibdenum, tungsten, dan renium. Dalam definisi yang lebih luas, titanium, vanadium, kromium, zirkonium, dan hafnium juga dapat digolongkan sebagai logam refraktori.

Niobium

Niobium dalam keadaan murni merupakan logam yang ulet dan mudah difabrikasi pada temperatur ruang. Titik lebur logam ini adalah 2.468°C . Niobium dapat membentuk lapisan oksida pada hampir semua lingkungan asam. Lapisan ini memberikan ketahanan korosi yang baik, khususnya terhadap asam nitrat dan hidroklorat. Pada temperatur yang tinggi,



GAMBAR 5.11 Aplikasi-aplikasi logam refraktori: (a) Pesawat luar angkasa menggunakan paduan Nb-10W-10Hf-0,1Y terutama pada bagian moncongnya; (b) filamen bola lampu yang terbuat dari tantalum, memiliki temperatur 400°C lebih rendah daripada filamen tungsten; (c) mur dan baut untuk aplikasi pada lingkungan bertemperatur tinggi yang terbuat dari tantalum; (d) termokopel yang terbuat dari paduan tungsten dan renium; (e) elemen pemanas untuk dapur yang terbuat dari molibdenum disilikat, MoSi_2 .

logam ini bereaksi dengan halogen, oksigen, nitrogen, karbon, hidrogen, dan sulfur. Reaksi tersebut membentuk senyawa yang memiliki titik lebur sangat tinggi, terutama jika bereaksi dengan karbon, boron, silikon, dan nitrogen.

Kebanyakan niobium ditemukan bersama dengan tantalum. Bijih niobium yang sering ditemukan adalah *columbite*, *niobite-tantalite*, *pyrochlore*, dan *euxenite*. Namun demikian, jumlah bijih niobium yang paling banyak ditemukan adalah *pyrochlore*. Proses ekstraksi niobium melibatkan proses klorinasi, diikuti dengan proses destilasi dan hidrolisis hingga dihasilkan bentuk oksida dari niobium. Niobium kemudian diekstrak melalui reaksi aluminotermik sesuai reaksi dalam persamaan berikut.



Selama reaksi ini, oksida akan terpisah dari niobium cair dan menjadi terak.

Penggunaan niobium lebih banyak pada aplikasi yang membutuhkan ketahanan temperatur tinggi, seperti komponen pesawat luar angkasa dan roket. Paduan Nb-10W-10Hf-0.1Y digunakan untuk kendaraan luar angkasa yang membutuhkan ketahanan temperatur tinggi ketika melintasi atmosfer bumi. Selain itu, paduan ini juga dipakai untuk pesawat supersonik, serta bagian moncong rudal dan roket. Seri yang digunakan untuk komponen nuklir adalah paduan Nb-1Zr, di mana memiliki ketahanan korosi dan ketahanan radiasi yang baik. Paduan ini juga digunakan dalam komponen lampu uap magnesium.

Tantalum

Dengan berat jenis sebesar $16,6 \text{ g/cm}^3$, tantalum termasuk ke dalam logam yang berat. Titik lebur logam ini mencapai 2.996°C . Selain itu, logam ini mempunyai keuletan, ketangguhan, dan konduktivitas termal yang sangat baik. Ketahanan korosi logam ini sangat baik, khususnya terhadap lingkungan asam, senyawa organik, dan larutan garam. Namun demikian, tantalum dapat terdegradasi oleh asam hidrofliorat, alkali kuat, bromin yang tercampur methanol, dan uap asam sulfat.

Logam tantalum umumnya berasal dari bijih *tantalite* ($\text{FeO} \cdot \text{Ta}_2\text{O}_5$). Proses ekstraksi biasanya diawali dengan memisahkan bijih dari pengotor dan melakukan pengendapan hidroksidanya. Proses dilanjutkan dengan melakukan kalsinasi untuk membentuk tantalum pentaoksida atau melakukan kristalisasi dengan potasium flourida (KF) hingga terbentuk potasium flourotantalat (K_2TaF_7). Potasium flourotantalat yang terbentuk kemudian direduksi dengan lelehan sodium hingga dihasilkan serbuk tantalum. Serbuk tantalum yang terbentuk dapat dimurnikan dengan proses peleburan sinar elektron hingga memperoleh kemurnian lebih dari 99,95%.

Tantalum dapat digunakan untuk filamen bola lampu. Filamen tantalum akan berpijar pada temperatur 1.700°C , lebih rendah 400°C dari filamen tungsten. Hal tersebut menjadikan bola lampu tantalum lebih unggul daripada bola lampu tungsten. Paduan Ta-10W biasa diaplikasikan pada komponen-komponen pesawat luar angkasa, seperti katup gas, mesin roket, dan baut pengencang. Dalam bidang kedokteran, tantalum banyak dipakai untuk

peralatan bedah dan peralatan kimia yang tahan terhadap zat asam. Tantalum juga dapat dimanfaatkan sebagai kapasitor yang diaplikasikan pada telepon seluler dan peralatan elektronik lain.

Molibdenum

Molibdenum merupakan logam berwarna putih keperakan yang ulet dan lebih lunak daripada tungsten. Logam ini memiliki titik lebur 2.621°C dan berat jenis $10,2 \text{ g/cm}^3$. Penguatan yang bisa dilakukan pada logam ini adalah dengan pengerasan regang saja, tidak bisa dengan perlakuan panas. Pada temperatur ruang, molibdenum tidak bereaksi dengan oksigen dan air. Namun demikian, pada temperatur tinggi, molibdenum bereaksi dengan oksigen membentuk molibdenum trioksida. Ekspansi panas yang dimiliki molibdenum paling kecil jika dibandingkan dengan logam komersial lainnya, sedangkan konduktivitas panasnya dua kali lipat besi.

Bijih molibdenum yang paling banyak diolah menjadi molibdenum adalah molibdenum disulfida (MoS_2). Bijih tersebut mengandung kurang lebih 60% molibdenum. Proses produksi molibdenum diawali dengan pembakaran molibdenum disulfida pada temperatur 700°C hingga teroksidasi menjadi molibdenum(VI) oksida (MoO_3). Oksida molibdenum tersebut kemudian diekstraksi menjadi serbuk molibdenum melalui proses reduksi dengan hidrogen.

Aplikasi molibdenum antara lain untuk unsur paduan pada baja dan besi tuang untuk meningkatkan kemampukerasan, ketangguhan, kekuatan, ketahanan mulur, dan ketahanan korosi. Molibdenum juga digunakan sebagai bahan dasar katoda yang dipakai pada radar. Di bidang industri, molibdenum dipakai untuk inti pada pengecoran dengan cetakan logam dan sebagai elemen pemanas pada dapur listrik. Industri nuklir, kimia, kaca, rudal, dan pesawat terbang juga banyak menggunakan molibdenum sebagai bahan dasarnya.

Tungsten

Tungsten merupakan logam berwarna putih keabu-abuan yang memiliki berat jenis $19,6 \text{ g/cm}^3$. Titik lebur yang mencapai 3.410°C menjadikan tungsten sebagai logam dengan titik lebur tertinggi di antara logam-logam lainnya. Pada temperatur ruang, tungsten tahan terhadap banyak zat kimia, tetapi tungsten dapat larut dalam larutan asam nitrat dan asam hidrofloxurat. Pada temperatur yang lebih tinggi, kecenderungan tungsten untuk "terserang" lebih besar. Pada temperatur lebih dari 250°C , tungsten bereaksi dengan cepat terhadap asam fosfat dan klorin. Tungsten akan teroksidasi di atas temperatur 500°C . Tungsten mulai bereaksi dengan banyak gas pada temperatur 1.000°C dan mulai bereaksi dengan logam-logam lain pada temperatur lebih dari 1.000°C .

Wolframite atau $(\text{FeMn})\text{WO}_3$ adalah bijih tungsten yang paling utama. Proses pengolahan bijih tungsten melalui beberapa tahap. Tahap awal yang paling penting adalah mengubah bijih tungsten menjadi bentuk oksidanya, WO_3 . Kemudian, oksida tersebut dipanaskan bersama hidrogen atau karbon agar menjadi serbuk tungsten. Serbuk tersebut selanjutnya dapat diolah dengan metalurgi serbuk menjadi produk padat.

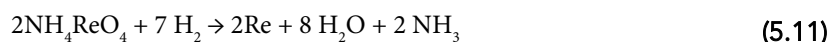
Tungsten diaplikasikan untuk alat potong dan berbagai aplikasi yang membutuhkan ketahanan aus. Dengan mengombinasikan tungsten bersama kobalt sebagai pengikat, tungsten dapat dibentuk menjadi karbida sementit yang tahan aus. Dalam bentuk kawatnya,

tungsten dapat dipakai untuk bohlam, peralatan elektronik, dan alat pengukur temperatur termokopel. Beberapa jenis paduan super juga memanfaatkan tungsten sebagai paduannya, seperti Hastelloy dan Stellite yang dipakai pada baling-baling turbin.

Renium

Renium merupakan logam dasar yang banyak terdapat pada beberapa jenis mineral, tetapi dalam jumlah yang sangat sedikit. Logam ini memiliki berat jenis $21,4 \text{ g/cm}^3$, atau hampir dua kali lebih berat daripada timbal. Titik lebur logam ini mencapai 3.180°C . Logam yang berwarna putih keperakan ini adalah logam yang cukup keras. Perbedaan logam ini dengan logam-logam refraktori lainnya adalah renium tidak dapat membentuk karbida. Ketahanan kimia renium tergolong baik karena tahan terhadap asam sulfat dan asam hidroklorat, tetapi tidak pada asam nitrat. Renium juga tahan terhadap timah, seng, perak, tembaga, dan aluminium cair.

Sumber renium yang umum adalah asam perrenik (HReO_4) dan amonium perrenat (NH_4ReO_4). Sumber yang lebih sering diolah menjadi logam renium adalah amonium perrenat. Amonium perrenat diubah menjadi serbuk renium melalui proses reduksi hidrogen. Reduksi hidrogen tersebut dilakukan pada 380°C sesuai dengan persamaan berikut.



Proses dilanjutkan dengan pemurnian dan siklus reduksi pada temperatur sekitar $700\text{--}800^\circ\text{C}$, untuk menghilangkan sisa renium oksida yang masih tersisa. Pembentukan serbuk menjadi logam padat biasanya dilakukan dengan penekanan dingin yang dilanjutkan dengan proses *sintering*.

Hasil proses *sintering* dapat dicanai dengan penganilan berulang hingga mampu dibentuk menjadi berbagai bentuk produk. Renium banyak dipasarkan dalam bentuk batangan, balok, lembaran, dan kawat. Paduan tungsten-renium merupakan paduan yang sering digunakan sebagai termokopel. Paduan super yang ditambahkan pada renium merupakan material untuk membuat komponen mesin pesawat jet.

5.6 Paduan Super

Paduan super merupakan suatu paduan yang memiliki kekuatan dan ketahanan mulur yang sangat baik pada temperatur tinggi. Di samping kuat, paduan super juga harus memiliki ketangguhan yang baik. Selain itu, paduan super juga harus memiliki kestabilan permukaan serta ketahanan yang baik terhadap korosi, oksidasi, karburisasi, dan sulfidisasi pada temperatur tinggi. Paduan yang digunakan untuk paduan super adalah besi, kobalt, nikel, krom, serta sejumlah tungsten, molibdenum, tantalum, titanium, dan aluminium. Aplikasi-aplikasi dari paduan super dapat dilihat pada Gambar 5.12

Berdasarkan unsur paduan dominannya, paduan super digolongkan menjadi tiga, sebagai berikut.

1. Paduan super berbasis nikel
2. Paduan super berbasis kobalt
3. Paduan super berbasis besi

Paduan Super Berbasis Nikel

Paduan super berbasis nikel didefinisikan sebagai paduan super yang unsur dominannya adalah nikel. Paduan ini mengandung 10–20% Cr; 5–10% Co; 8% maksimum Al dan Ti, serta dalam jumlah kecil B, Zr, dan C. Terkadang, unsur-unsur Mo, W, Ta, Hf, Fe, dan Nb sering juga ditambahkan. Kromium merupakan unsur yang membuat paduan super ini tahan terhadap oksidasi. Unsur B dan Zr ditambahkan sebagai unsur penguat batas butir yang mampu bersegregasi ke batas butir dan menguatkannya terutama pada temperatur yang tinggi. Pada temperatur tinggi, kegagalan pada logam lebih dikarenakan luncuran di batas butir (*grain boundary sliding*). Oleh karena itu, B dan Zr akan mampu meningkatkan ketahanan mulur dan keuletan paduan super. Selain itu, unsur C, Cr, Mo, W, C, Nb, Ta, Ti, dan Hf mampu membentuk karbida yang akan mengendap di batas butir. Unsur-unsur Co, Fe, Cr, Nb, Ta, Mo, W, V, Ti, dan Al juga dapat bertindak sebagai penguat larutan padat.



(a)



(b)



(c)



(d)

GAMBAR 5.12 Aplikasi paduan super: (a) Baling-baling turbin untuk pesawat, (b) pipa-pipa yang digunakan di laut, (c) sistem pembuangan pada mobil Formula 1, dan (d) komponen-komponen reaktor nuklir.

Titanium dan aluminium memiliki peranan yang penting pada paduan super berbasis nikel. Unsur tersebut menstabilkan fasa gamma-aksen (γ'), sedangkan unsur Co, Cr, Mo, dan W merupakan penstabil fasa gamma (γ). Fasa γ merupakan fasa Al atau Ni, sedangkan fasa γ' memiliki rumus kimia Ni_3Al , Ni_3Ti , atau $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$. Fasa tersebut dapat membentuk endapan yang stabil dan merata pada matriks. Fasa tersebut cukup ulet.

Dengan demikian, di samping menguatkan matriks, fasa ini tidak menurunkan nilai ketangguhan retaknya. Kekuatan logam biasanya menurun seiring meningkatnya temperatur karena pada temperatur yang tinggi dislokasi akan mudah untuk bergerak. Akan tetapi, tidak demikian untuk paduan super berbasis nikel yang mengandung γ' . Paduan ini tahan terhadap temperatur yang tinggi.

Kebanyakan paduan super berbasis nikel digunakan untuk aplikasi turbin yang membutuhkan ketahanan pada temperatur tinggi. Paduan *nimonic* yang mengandung 75% nikel, 21% kromium, 2,5% titanium, 0,7% besi, 0,6% aluminium dan 0,5% karbon merupakan paduan super yang digunakan untuk membuat baling-baling turbin. *Waspaloy* yang mengandung 55% nikel, 20% kromium, 13% kobalt, 4% molibdenum dan 5% besi juga merupakan material untuk membuat baling-baling dan piringan turbin. *Inconel* juga tergolong paduan super berbasis nikel yang digunakan untuk sistem pembuangan mobil balap Formula 1 dan juga tempat pembakaran sisa pembuangan pada boiler.

Paduan Super Berbasis Kobalt

Paduan super berbasis kobalt didefinisikan sebagai paduan super yang unsur dominannya adalah kobalt. Paduan super berbasis kobalt mengandung 10–30% Ni, 25% Cr; 15% W serta berbagai unsur dalam jumlah kecil, seperti Mo, Nb, Ta, Ti, La, dan Fe. Penguatan yang terjadi pada paduan ini adalah penguatan larutan padat dan penguatan oleh karbida. Paduan yang penguatan dominannya adalah penguatan karbida biasanya mengandung karbon sekitar 0,4–0,85%. Paduan yang penguatannya adalah penguatan larutan padat dibagi menjadi tiga, yaitu (1) paduan yang digunakan pada temperatur sekitar 650–1.150°C, (2) paduan yang digunakan pada temperatur $\pm 650^\circ\text{C}$, dan (3) paduan yang tahan aus. Pada kenyataannya, tidak ada paduan super yang penguatan larutan padatnya dapat dikatakan 100% (sempurna), tetapi terdapat fase kedua berupa karbida atau intermetalik pada paduan tersebut.

Pengerasan dengan karbida menjadi keharusan pada paduan super berbasis kobalt untuk mendapatkan sifat mekanik yang lebih baik. Untuk itu, kadar karbon biasanya ditinggikan. Karbida yang terbentuk merupakan persenyawaan karbon dengan logam, seperti Cr, W, V, dan sebagainya. Pada paduan super berbasis kobalt, hasil pengecoran yang mengandung 0,4% C biasanya terdapat karbida Cr_{23}C_6 , Cr_3C_2 , MC, atau M_6C . Perbandingan jumlah kromium dan karbon menentukan jenis karbida kromium yang terbentuk. Bentuk karbida pun dapat dimodifikasi menjadi bentuk yang bulat, panjang, dan terpisah. Temperatur penuaan dan pendinginan yang dilakukan memainkan peranan penting terhadap distribusi dan bentuk dari karbida tersebut.

Paduan super berbasis kobalt dapat dianil atau anil pelepasan tegangan, tetapi jarang yang dilakukan perlakuan pelarutan sebab pada paduan jenis ini tidak terdapat fasa γ' seperti yang terdapat pada paduan super berbasis nikel. Perlakuan panas penuaan mungkin dilakukan, tetapi tujuannya adalah untuk memodifikasi distribusi dari karbida. Untuk paduan super berbasis kobalt, hasil pengerjaan, anil, dan pelepasan tegangan sangat dianjurkan untuk menghilangkan tegangan sisa hasil proses fabrikasi. Anil pada paduan super berbasis kobalt hasil pengecoran sangat tidak dianjurkan sebab akan terbentuk karbida yang kasar pada saat pendinginan setelah anil.

UMCo-50 merupakan salah satu contoh merek dagang paduan super berbasis kobalt yang sering digunakan untuk komponen-komponen dapur pembakaran. MP-35N dan MP-159 digunakan untuk baut yang dipakai untuk aplikasi-aplikasi pada temperatur tinggi. Haynes 25 adalah paduan super berbasis kobalt yang terkenal dan digunakan untuk bagian turbin gas, reaktor nuklir, dan baut khusus.

Paduan Super Berbasis Besi

Paduan super berbasis besi didefinisikan sebagai paduan super yang unsur dominannya adalah besi. Penguatan pada jenis paduan super ini adalah dengan larutan padat, pengendapan intermetalik, dan pengendapan karbida. Beberapa unsur ditambahkan pada paduan ini untuk menciptakan sifat yang diinginkan. Karena struktur kristal paduan ini dominannya adalah FCC, beberapa unsur, seperti nikel, aluminium, titanium, dan niobium, dapat ditambahkan sebagai penguat. Karbon ditambahkan sekitar 0,5% untuk membentuk endapan karbida. Terkadang, nitrogen dan fosfor juga ditambahkan untuk mempertinggi pengaruhnya. Karbida yang terbentuk dapat juga bertindak sebagai penguat batas butir. Ketahanan oksidasi pada paduan super berbasis besi diberikan melalui penambahan kromium, nikel, dan mangan. Penambahan boron sangat membantu meningkatkan sifat pada temperatur tinggi. Semua paduan super berbasis besi pada penggunaan temperatur tinggi berstruktur FCC, sebab struktur FCC lebih tahan terhadap mulur.

Paduan super berbasis besi umumnya jarang dilakukan pelepasan tegangan. Paduan yang diberikan pengerjaan panas atau dingin biasanya membutuhkan pelepasan tegangan untuk menghilangkan tegangan sisa dan meningkatkan keuletan. Namun demikian, pelepasan tegangan pada paduan tersebut tidak dapat dilakukan jika ketahanan korosi yang tinggi juga dibutuhkan. Karena temperatur pelepasan tegangan yang dianjurkan biasanya berada di antara rentang temperatur sensitasi, anil lebih disarankan untuk dilakukan. Beberapa paduan juga tidak bisa dilakukan pelepasan tegangan karena masalah pada endapannya.

Paduan super berbasis besi yang mengandung titanium dan aluminium umumnya mengalami penguatan endapan fasa γ' . Fasa γ' tergolong pada fasa yang metastabil karena dapat berubah menjadi fasa η (Ni_3Ti) jika rasio aluminium dan titanium terlalu rendah. Perlakuan panas yang diberikan pada paduan tersebut adalah perlakuan pelarutan diikuti dengan penuaan. Perlakuan pelarutan dan penuaan yang diberikan pada paduan tersebut berbeda-beda—bergantung pada pengerjaan dingin yang telah dilakukan pada paduan tersebut.

Beberapa contoh paduan super berbasis besi, seperti paduan A-268, Incoloy 901, INCO 718, INCO 901, dan *Multimet*. Sama seperti paduan super jenis lain, paduan-paduan super tersebut umumnya digunakan untuk aplikasi-aplikasi pada temperatur tinggi, seperti turbin, roket, reaktor nuklir, dan lain-lain.

5.7 Logam Mulia

Logam mulia merupakan logam berharga yang biasa digunakan untuk membuat koin, perhiasan, dan ornamen-ornamen khusus. Logam yang tergolong sebagai logam mulia adalah emas, perak, dan golongan platina (seperti rutenium, rodium, paladium, osmium, iridium, dan platina). Logam tersebut diberi nama logam mulia karena tidak mudah terdegradasi dan memiliki kilauan yang khas. Logam tersebut juga lebih ulet dan memiliki titik lebur lebih tinggi daripada logam-logam lainnya. Pada bagian ini, logam mulia yang akan dibahas hanya emas, perak, dan platina karena merupakan logam mulia yang paling umum.

Emas

Karakteristik Emas

Emas merupakan logam lunak yang berwarna kuning, yang sudah terkenal sebagai logam berharga sejak zaman dahulu. Logam ini merupakan logam yang nonreaktif secara kimia, yang dapat langsung ditemukan di alam dalam bentuk logamnya. Berat jenis emas mencapai $19,3 \text{ g/cm}^3$, sedangkan titik leburnya mencapai $1.064,18^\circ\text{C}$. Jika dibandingkan dengan logam murni lainnya, emas merupakan logam murni yang paling ulet dan mudah ditempa. Satu gram emas dapat dibentuk menjadi lembaran dengan luas $0,6$ meter persegi. Emas yang sudah dicetak memiliki kekuatan tarik sebesar 137 MPa . Emas juga merupakan konduktor panas dan listrik yang baik, serta mampu menepis radiasi infra merah.

Kemurnian emas dinyatakan dengan satuan karat. Emas murni memiliki nilai sebesar 24 karat. Emas merupakan logam yang tahan terhadap korosi dan zat-zat kimia, tetapi tidak semua zat kimia. Halogen bebas dapat bereaksi dengan emas, sedangkan aqua regia (dikenal juga sebagai air raja) melarutkan emas dengan cara membentuk gas klorin yang dapat menyerang emas hingga membentuk ion kloraurat. Emas juga larut dalam larutan alkali seperti potasium sianida dan dalam merkuri membentuk amalgamasi emas-merkuri.

Proses Pengolahan Emas

Di alam, emas sudah ada dalam wujud logamnya, tidak berikatan dengan unsur lain. Namun demikian, bijih emas yang ditemukan di alam biasanya mengandung berbagai material, yang dikenal sebagai material ikutan. Dalam satu bongkahan bijih (logam) saja, jumlah material ikutan jauh lebih banyak jika dibandingkan dengan emas itu sendiri. Selain metode tradisional, proses perolehan logam emas untuk skala yang lebih besar sudah mulai dikembangkan sejak tahun 1783. Pada saat itu, diketahui bahwa emas dapat larut dalam larutan alkali sianida. Proses tersebut kemudian dinamakan sianidasi. Proses sianidasi merupakan proses pelarutan emas dengan larutan natrium sianida. Temperatur yang digunakan tidak terlalu tinggi, biasanya optimum pada temperatur 85°C . Proses sianidasi dijelaskan oleh Elsner sesuai reaksi dalam persamaan:



Proses sianidasi ini adalah proses elektrokimia, di mana oksigen mengambil elektron dari emas pada daerah katoda, sedangkan ion emas dengan cepat membentuk kompleks aurosianida di daerah anoda. Setelah menjadi larutan kompleks, emas dapat diekstraksi dengan beberapa metode salah satunya adalah dengan (metode) *electrowining*. Dalam metode *electrowining*, larutan kompleks dilewatkan pada sel *electrowining* yang terdiri dari anoda dan katoda yang terbuat atas pelat baja tahan karat. Sel *electrowining* dapat dilihat pada Gambar 5.13. Emas dengan sendirinya akan menempel pada katoda. Selanjutnya, katoda dibersihkan dan endapan emas yang ada pada katoda diambil. Endapan emas kemudian dikeringkan. Karena serbuk emas yang diperoleh masih mengandung fluks maka selanjutnya emas dilebur pada temperatur 1.200°C hingga dihasilkan emas murni.

Aplikasi Emas

Beberapa negara menggunakan emas sebagai alat transaksi ekonomi. Nilai uang yang terbuat dari emas dilihat dari nilai intrinsiknya. Semakin besar kandungan emas, semakin tinggi nilai uang tersebut. Namun demikian, penggunaan emas sebagai uang logam mulai tergantikan ketika pemerintah melegalkan uang kertas sebagai alat pertukaran. Penggunaan emas yang paling dominan saat ini adalah sebagai perhiasan. Perhiasan dapat terbuat dari emas murni ataupun paduannya. Emas putih merupakan paduan emas dengan nikel



GAMBAR 5.13 Sel electrowining dalam proses perolehan logam emas.

atau paladium, emas biru merupakan paduan emas dengan besi, dan emas ungu merupakan paduan emas dengan aluminium. Emas merupakan material yang digunakan untuk pelapisan sampel nonkonduktif yang akan dilakukan pengamatan mikro menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Emas juga dapat digunakan pada bidang kedokteran, di antaranya untuk gigi palsu, serta obat untuk mengurangi sakit bagi penderita rheumatoid arthritis dan tuberkulosis.

Perak

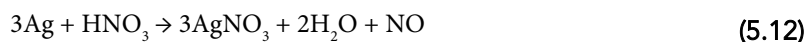
Karakteristik Perak

Perak merupakan logam yang berwarna putih berkilau dan cukup lunak. Logam ini merupakan logam yang paling putih dan dapat dipoles, serta logam ini juga telah dikenal sejak zaman dahulu sebagai logam yang berharga. Perak menempati urutan pertama sebagai logam dengan konduktivitas listrik dan konduktivitas panas tertinggi di antara logam-logam lainnya. Namun karena harganya yang mahal, tembaga lebih banyak digunakan sebagai penghantar listrik daripada perak. Titik lebur perak mencapai 964°C dan berat jenisnya adalah 10,7 g/cm³.

Pada dasarnya, perak tahan terhadap udara dan air yang murni. Namun pada udara bebas, warna perak biasanya memudar karena membentuk perak sulfida. Sulfur dapat “menyerang” perak dengan cepat. Lapisan perak sulfida yang terbentuk dapat memudahkan warna perak dan menambah ketahanan listrik pada permukaannya, tetapi hal tersebut tidak membuat perak terkorosi. Salah satu upaya pencegahannya adalah dengan melakukan pelapisan. Teknik pelapisan yang dilakukan salah satunya dengan menggunakan rodium dan nikel.

Proses Pengolahan Perak

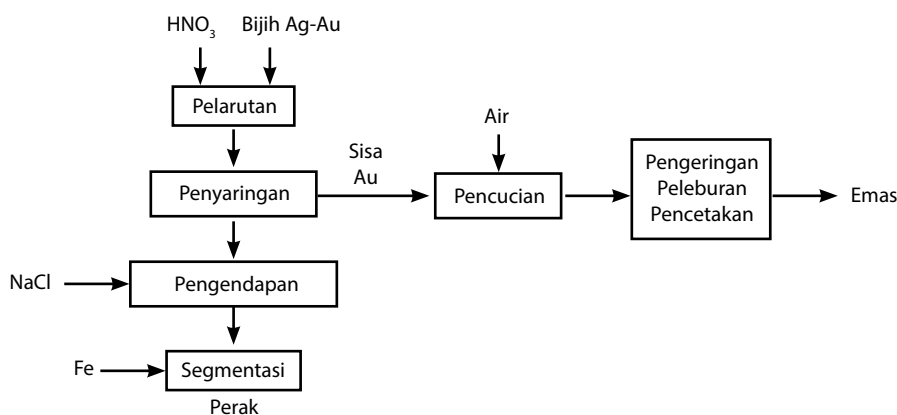
Kebanyakan bijih logam perak ditemukan bersamaan dengan bijih logam emas. Proses sianidasi juga dapat dilakukan pada bijih perak. Dengan demikian, produk yang biasanya dihasilkan pada proses *electrowining* emas bukanlah 100% emas murni, melainkan batangan emas dan perak dengan kandungan tertentu. Apabila dalam suatu bijih ditemukan unsur perak yang lebih dominan daripada emas dan yang ingin didapatkan adalah logam perak sepenuhnya maka proses pelarutan dengan asam nitrat dapat memisahkan perak dengan emas. Proses pelarutan tersebut sesuai reaksi dalam persamaan:



Reaksi ini dilakukan pada suatu bejana baja tahan karat. Gas NO yang dihasilkan dioksidasi untuk memperoleh HNO₃, yang dapat digunakan kembali untuk proses selanjutnya. Larutan kemudian diendapkan sebagai AgCl dengan menambahkan NaCl. Selanjutnya, logam perak dapat diperoleh dengan menambahkan besi. Rangkaian skematis proses ekstraksi tersebut digambarkan dalam Gambar 5.14.

Aplikasi Perak

Karena harganya yang cukup tinggi, perak umumnya digunakan sebagai perhiasan dan medali. Aplikasi lain perak adalah untuk membuat campuran bersama timah dan raksa untuk penambalan gigi. Kekentalan campuran tersebut disesuaikan dengan jumlah yang digunakan untuk mengisi lubang pada gigi. Dalam beberapa menit, campuran tersebut akan sedikit mengeras dan dalam beberapa jam akan menjadi sangat keras. Di bidang fotografi, perak digunakan untuk mencetak foto dalam bentuk perak nitrat dan perak halida. Namun seiring dengan perkembangan zaman, perak jarang digunakan karena dunia fotografi sudah beralih ke model digital. Barang-barang elektronik juga memanfaatkan perak karena konduktivitas listriknya yang sangat tinggi, misalnya keyboard (papan tuts) komputer, perangkat audio yang canggih, dan papan sirkuit cetak.



GAMBAR 5.14 Proses pemurnian perak dari emas dengan menggunakan asam nitrat.

Platina

Karakteristik Platina

Platina merupakan logam mulia yang berwarna putih keabu-abuan dan ulet. Keuletan platina mampu melebihi emas, perak, dan tembaga. Titik lebur platina mencapai 1.754°C dan berat jenisnya mencapai $21,45 \text{ g/cm}^3$. Konduktivitas listriknya hanya 16% dari konduktivitas listrik tembaga. Logam ini tidak teroksidasi pada berbagai temperatur, tetapi dapat terkorosi oleh halogen, sianida, dan alkali kuat.

Proses Pengolahan Platina

Platina merupakan logam yang *inert*. Keberadaanya di alam tidak bersenyawa dengan unsur lain, melainkan murni sebagai logam platina. Namun demikian, bijih logam platina di alam biasanya terkontaminasi oleh material-material lain sehingga diperlukan proses pemisahan lebih lanjut. Banyak logam platina yang ditambang bersamaan dengan nikel dan tembaga karena platina sering kali menjadi material ikutan pada bijih tembaga dan nikel. Selama proses pemurnian nikel, logam-logam mulia—seperti emas, perak dan platina, serta selenium dan telurium—akan mengendap ke bagian dasar dari sel *electrorefining* sebagai lumpur anoda.

Produksi platina langsung dari bijih logam platina dapat dilakukan dengan beberapa metode. Logam platina biasanya memiliki berat jenis yang lebih tinggi daripada material-material ikutannya. Dengan demikian, platina dapat dipisahkan dari material pengikutnya melalui metode pengapungan biasa pada suatu kolam air. Sifat platina yang nonmagnetik dapat dimanfaatkan untuk memisahkannya dari pengotor-pengotor yang magnetik, seperti besi dan nikel, melalui metode pemisahan magnetik. Titik lebur platina biasanya lebih tinggi daripada material ikutannya. Jadi dengan membakar bijih logam platina, material ikutannya akan mencair dan terpisah, sedangkan platina tidak. Ketahanan platina terhadap asam hidroklorat dan asam sulfat membuatnya dapat dipisahkan dari pengotor yang tidak tahan terhadap kedua asam tersebut. Dengan memasukkan dan mengaduk bijih logam platina pada campuran kedua asam tadi, logam platina dapat diperoleh. Salah satu atau kombinasi dari teknik-teknik pemisahan tersebut dapat diterapkan dalam suatu rangkaian proses produksi platina hingga didapatkan logam platina yang benar-benar murni.

Untuk pemurnian bijih logam platina yang mengandung emas dan golongan platina lainnya, penambahan *aqua regia* akan lebih efektif. Dalam *aqua regia*, paladium, emas, dan platina akan larut, sedangkan osmium, iridium, rutenium, dan rodium tetap tidak beraksi. Emas akan diendapkan dari larutan dengan besi(III) klorida. Kemudian, platina diendapkan sebagai amonium kloroplatina dengan menambahkan amonium klorida. Selanjutnya, amonium kloroplatina dapat diubah menjadi logam platina dengan pemanasan.

Aplikasi Platina

Sama seperti logam mulia lainnya, platina juga sering digunakan sebagai perhiasan. Jam tangan mewah sering memanfaatkan platina sebagai material pembuatnya dan diproduksi dalam jumlah yang terbatas. Pemanfaatan platina lainnya adalah sebagai katalis pada reaksi kimia. Serbuk platina dapat digunakan untuk mengatalisis reaksi pembakaran hidrogen. Karena ketahanan korosinya, platina sering digunakan untuk pelapisan pada komponen elektronik yang membutuhkan kondisi operasi yang prima. Proses pelapisan yang dapat digunakan adalah *electroplating* dalam suatu wadah yang berisi platina diklorida, PtCl_2 , atau platina tetraklorida, PtCl_4 . Selain itu, pelapisan dapat juga dilakukan dengan metode deposit uap dan pengecatan menggunakan campuran serbuk platina.

Latihan

1. Temukan informasi mengenai lokasi deposit bijih logam non-fero di Indonesia, yang telah dibahas dalam bab ini.
2. Temukan benda-benda di sekitar Anda yang terbuat dari logam non-fero .
3. Jelaskan tahapan proses Bayer dan Hall-Heroult pada pembuatan aluminium.
4. Sebutkan pabrik alumina dan aluminium yang terdapat di Indonesia.
5. Mengapa aluminium dikatakan tidak korosif?
6. Jelaskan aplikasi aluminium dalam dunia transportasi.
7. Mengapa mesin sepeda motor dibuat dari aluminium?
8. Mengapa paduan super memiliki ketahanan temperatur yang sangat baik?
9. Jelaskan tahapan proses ekstraksi logam tembaga dan emas yang ada di PT Freeport Indonesia, Papua, Indonesia.
10. a. Jelaskan tahapan pemrosesan magnesium.
b. Apa yang menjadi tantangan utama dalam pemrosesan magnesium menjadi bahan jadi? Jelaskan.

PEMBENTUKAN DAN PERLAKUAN PANAS LOGAM

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

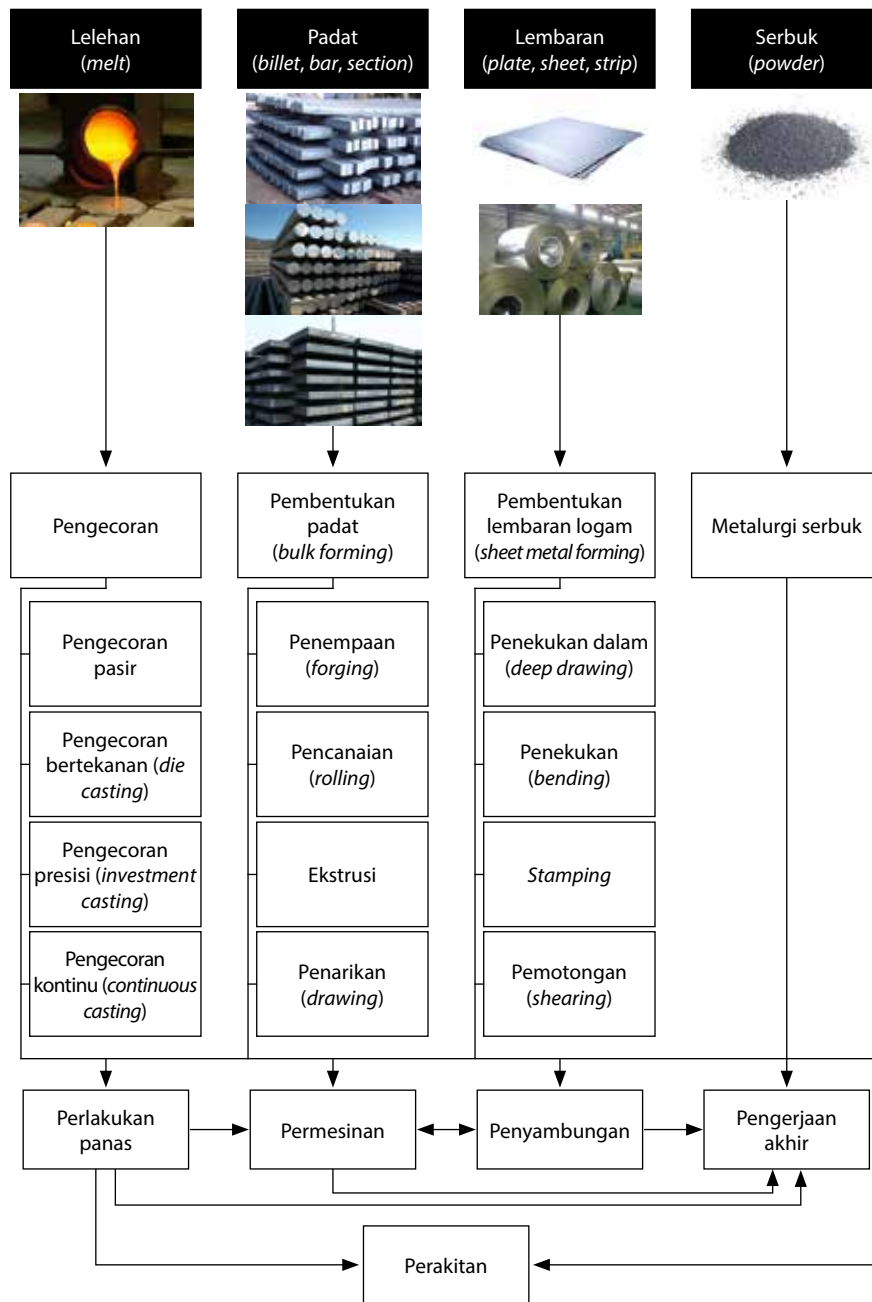
1. Menjelaskan empat jenis proses pembentukan logam.
2. Menjelaskan proses dan tujuan perlakuan panas yang meliputi anil, penghilangan tegangan, normalisasi, dan sferoidisasi.
3. Menjelaskan proses perlakuan panas difusi permukaan dan aplikasinya.
4. Menjelaskan beberapa jenis proses penyambungan logam dan contoh aplikasinya.
5. Menjelaskan proses pembentukan sebuah barang atau komponen.

6.1 Pendahuluan

Setelah membahas berbagai jenis logam, baik logam fero di Bab 4 maupun logam nonfero di Bab 5, maka proses pembentukan logam akan dibahas pada bab ini. Keputusan pemilihan material untuk sebuah aplikasi harus (1) mempertimbangkan karakteristik material tersebut dan (2) mempertimbangkan kemudahan dalam memprosesnya hingga mendapatkan bentuk yang diinginkan. Sifat logam akan berubah setelah mengalami pembentukan, dan sifat ini masih dapat diubah lebih lanjut dengan perlakuan panas. Oleh karena itu, setelah membahas proses pembentukan logam, bab ini juga akan membahas proses perlakuan panas yang meliputi anil, penghilangan tegangan, normalisasi dan sferoidisasi, serta proses pengerasan pengendapan.

Ada beberapa proses pembentukan logam dari bahan setengah jadi menjadi produk jadi yang dapat kita temui sehari-hari. Gambar 6.1 menjelaskan diagram alir proses pembentukan material secara umum, yang diawali dari berbagai jenis produk setengah jadi. Proses pembentukan ini dapat dilakukan pada hampir seluruh material logam, baik fero maupun nonfero.

MATERIAL AWAL



GAMBAR 6.1 Diagram alir proses pembentukan logam.

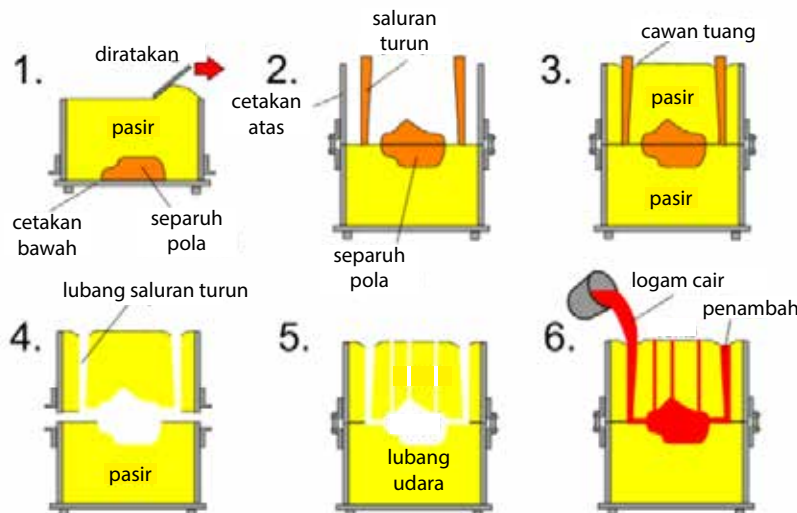
6.2 Pengecoran

Pengecoran adalah proses fabrikasi logam, di mana logam dilelehkan dan kemudian dituangkan ke dalam cetakan yang memiliki bentuk sesuai dengan desain. Lelehan logam akan membeku sesuai bentuk cetakan dan mengalami sedikit penciutan (*shrinkage*). Pengecoran umumnya dilakukan untuk membuat komponen-komponen

yang besar dan memiliki bentuk yang rumit, serta pada material yang memiliki keuletan yang sangat rendah, seperti misalnya besi tuang, sehingga tidak dapat dibentuk secara padat. Secara umum, proses pengecoran relatif lebih ekonomis dibandingkan dengan proses pembentukan padat (*bulk forming*). Ada beberapa teknik pengecoran logam, seperti (1) pengecoran pasir (*sand casting*), (2) pengecoran bertekanan (*die casting*), (3) pengecoran presisi (*investment casting*), dan (4) pengecoran kontinu (*continuous casting*).

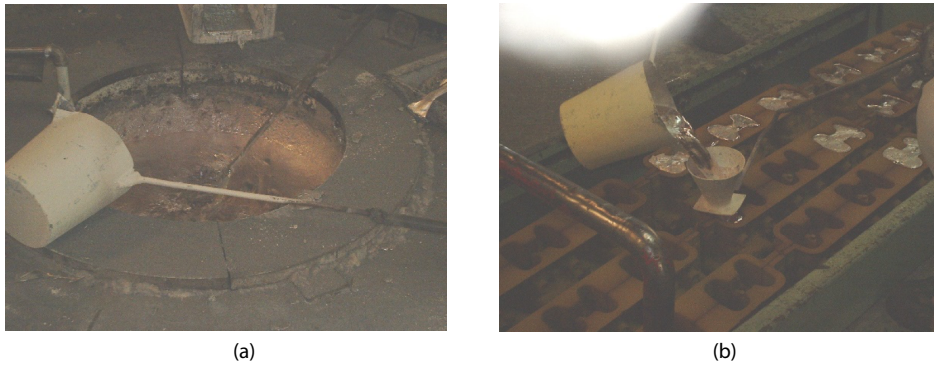
Pengecoran Pasir

Pengecoran pasir adalah jenis pengecoran yang paling banyak digunakan. Umumnya, pengecoran pasir digunakan untuk memproduksi produk berukuran relatif besar. Cetakan dibuat dari pasir biasa yang diberi resin pengikat. Sepasang cetakan pasir dibuat dengan mengisi pasir di sekitar pola (umumnya terbuat dari kayu) sesuai bentuk yang diinginkan. Pola juga mencakup sistem pemasukan (*gating system*) untuk memasukkan logam cair ke dalam cetakan. Tahapan pembuatan cetakan pasir dapat dilihat pada Gambar 6.2. *Pertama*, setengah pola diletakkan di tengah cetakan bawah (*drag*). Pasir diisikan disekitar pola hingga seluruh cetakan bawah penuh, dipadatkan, dan diratakan. *Kedua*, cetakan bawah dibalik menghadap atas dan cetakan bagian atas (*cope*) dipasangkan berikut setengah pola atas beserta sistem pemasukan. *Ketiga*, pasir diisikan hingga seluruh cetakan atas penuh, dipadatkan, dan diratakan. *Keempat*, cetakan atas dan bawah dilepas kembali kemudian pola berikut sistem pemasukan dikeluarkan dengan hati-hati. Dengan demikian, terdapat lubang pada pasir sesuai dengan bentuk pola dan sistem pemasukan. *Kelima*, cetakan atas dipasangkan kembali pada cetakan bawah dengan hati-hati. *Keenam*, logam cair dituangkan ke dalam cetakan melalui sistem pemasukan (*lihat Gambar 6.3*). Umumnya, logam



GAMBAR 6.2 Tahapan pembuatan cetakan pasir.

Sumber: Diadaptasi dari Warren Design and Technology, "Sand Casting", <http://www.the-warren.org/GCSERevision/engineering/casting.htm>.



GAMBAR 6.3 (a) Proses peleburan logam cair di dalam dapur, (b) penuangan logam cair dengan metode gravitasi ke dalam cetakan pasir.



GAMBAR 6.4 Beberapa contoh produk pengecoran pasir.

cair dituangkan dengan bebas sehingga mengalir mengikuti gaya gravitasi. Dengan demikian, metode penuangan seperti ini sering disebut sebagai metode gravitasi. Beberapa contoh produk pengecoran pasir dapat dilihat pada Gambar 6.4.

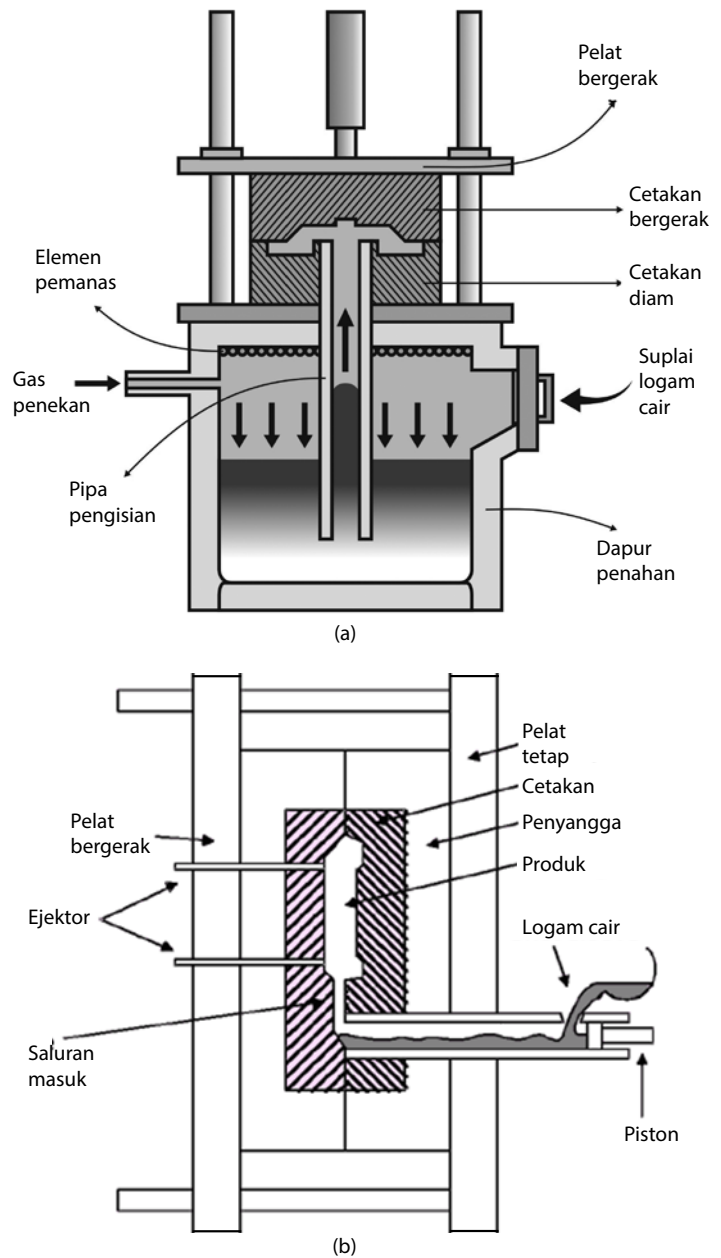
Pengecoran Bertekanan

Pada pengecoran bertekanan, logam cair dimasukkan dengan **menggunakan tekanan** ke dalam cetakan dan pembekuan terjadi dalam kondisi bertekanan. Umumnya, cetakan terbuat dari logam dan terdiri atas dua bagian. Ada dua jenis pengecoran bertekanan, yaitu (1) **Low Pressure Die Casting (LPDC)** dan (2) **High Pressure Die Casting (HPDC)**. Penampang mesin LPDC dapat dilihat pada Gambar 6.5(a) dan contoh mesin LPDC dapat dilihat pada Gambar 6.6(a). Pada proses pengecoran LPDC, cetakan logam terdiri atas dua bagian, yaitu diletakkan secara vertikal di atas dapur peleburan dan dihubungkan oleh sebuah pipa pengisian. Dengan memberikan tekanan pada dapur (umumnya, antara 20–100 kPa), cairan logam akan naik lalu masuk ke dalam cetakan dari bawah. Setelah proses pembekuan selesai, tekanan dilepaskan, cetakan terbuka, serta benda cor diambil dan proses pengecoran siklus berikutnya dapat dilanjutkan.

Proses LPDC banyak dipakai untuk menghasilkan produk cor yang radial dan simetris dengan ketebalan 2–3 mm. Namun demikian, beberapa produk cor yang tidak simetris pun dapat dihasilkan melalui proses ini. Pelek mobil, piston, dan bantalan merupakan beberapa contoh produk cor hasil proses LPDC. Parameter-parameter proses di dalam sistem LPDC antara lain adalah tekanan, kecepatan/waktu tekanan berlangsung, dan gradien temperatur. Kecepatan/waktu

tekanan berlangsung menentukan siklus satu buah produk dapat dihasilkan. Permasalahan lain yang sering terjadi pada proses LPDC adalah logam cair dapat mengalami oksidasi ketika satu produk selesai dihasilkan. Ketika satu buah produk selesai maka cetakan akan terbuka dan menyebabkan tekanan vakum pada pipa pengisian akan hilang. Dengan hilangnya tekanan tersebut, logam cair yang masih terdapat dalam pipa pengisian akan jatuh ke dalam dapur dan membentuk oksida dalam logam cair yang ada di dalamnya. Permasalahan ini dapat diatasi dengan cara memberikan tekanan balik (*back pressure*) selama proses pembukaan cetakan berlangsung. Dengan adanya tekanan balik, logam cair yang masih tersisa dalam *tube* tidak akan jatuh kembali ke dalam dapur.

Secara prinsip, proses HPDC tidak jauh berbeda dengan LPDC. Logam cair mengisi cetakan dari samping dengan tekanan oleh piston hidrolik [lihat Gambar 6.5(b) dan 6.6(b)]. Untuk produk yang lebih tipis (1 hingga 2,5 mm), pembuatannya umum dari proses HPDC agar seluruh rongga cetakan dapat terisi dengan baik. Selain itu, permukaan produk memiliki kehalusan yang lebih baik daripada produk LPDC. Contoh produk LPDC dan HPDC dapat dilihat pada Gambar 6.7.



GAMBAR 6.5 Proses (a) Low Pressure Die Casting (LPDC) dan (b) High Pressure Die Casting (HPDC).

Sumber: Diadaptasi dari <http://www.energymanagertraining.com/aluminium/AluCastings.htm>.

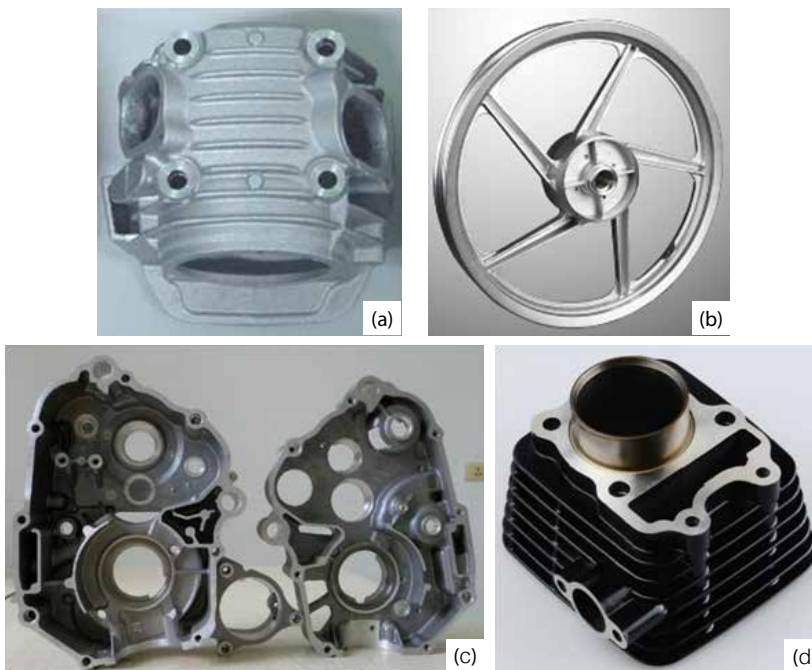
Pengecoran Presisi

Pada proses pengecoran presisi (yang dikenal juga sebagai *lost-wax casting*), lubang cetakan dibuat dari lilin (wax) atau plastik yang memiliki temperatur lebur rendah. Lilin dibentuk sesuai bentuk produk yang diinginkan melalui proses injeksi [lihat Gambar 6.8(a)]. Beberapa pola lilin tersebut kemudian digabung dengan saluran masuk menjadi sebuah pohon (*tree*)—lihat Gambar 6.8(b). Selanjutnya, pembuatan kulit cetakan [Gambar 6.8(c)] dilakukan, di mana pola dari lilin tersebut dilumuri dengan bubuk keramik dan ditaburi serbuk keramik untuk memperkuat.



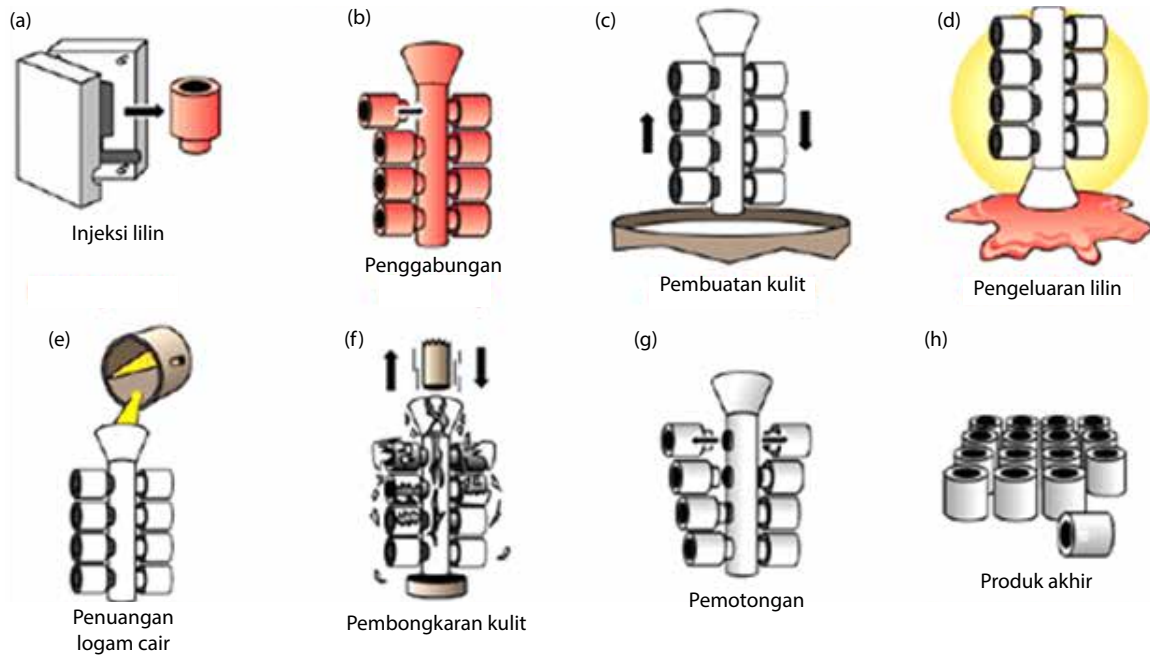
GAMBAR 6.6 Mesin (a) Low Pressure Die Casting (LPDC) dan (b) High Pressure Die Casting (HPDC).

Sumber: Diadaptasi dari <http://www.energymanagertraining.com/aluminium/AluCastings.htm>.



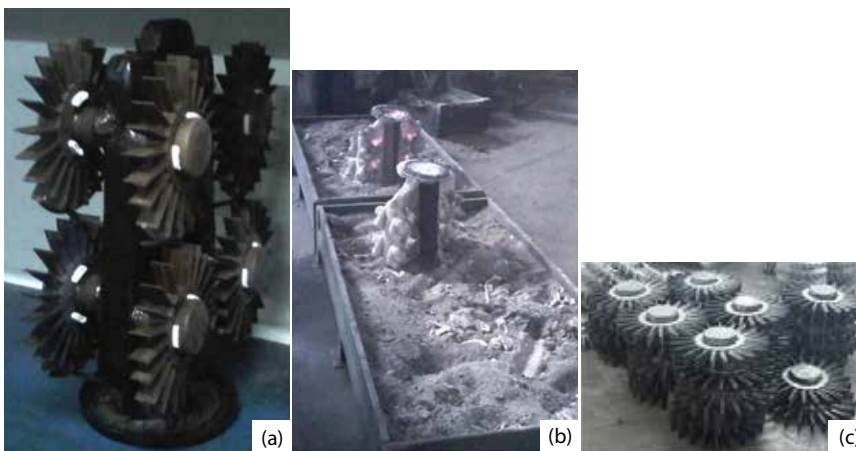
GAMBAR 6.7 Contoh komponen sepeda motor yang dibuat dengan proses LPDC: (a) *Cylinder head*, (b) pelek sepeda motor; dan proses HPDC: (c) *Crankcase*, (d) *cylinder comp.*

Cetakan bubuk keramik tersebut dikeringkan di udara selama lebih kurang 24 jam. Proses diulangi 2–3 kali hingga mendapat ketebalan yang cukup. Cetakan keramik kemudian dipanaskan di dalam autoklaf dalam posisi terbalik sehingga lilin meleleh keluar dan meninggalkan rongga cetakan sesuai bentuk pola [Gambar 6.8(d)]. Setelah itu, cetakan keramik dipanaskan pada temperatur 900–1.100°C dan siap digunakan. Logam cair kemudian dituang ke dalam cetakan keramik [Gambar 6.8(e)]. Setelah dingin, cetakan keramik dibongkar/dipecahkan [Gambar 6.8(f)] dan produk cor yang dihasilkan umumnya dapat



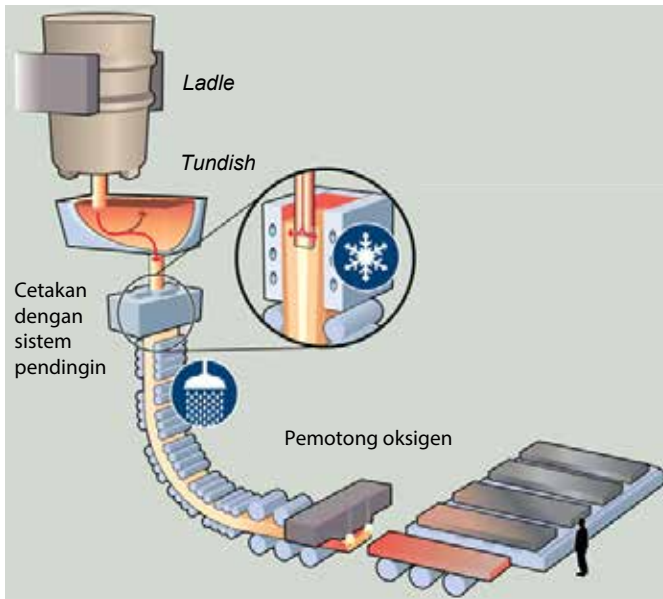
GAMBAR 6.8 Tahapan proses pengecoran presisi.

Sumber: Diadaptasi dari Casting Quality, "Investment Casting Process", <http://www.castingquality.com/casting-technology/investment-casting-tech/investment-casting-process.html>.



GAMBAR 6.9 Proses pengecoran presisi untuk membuat sudu: (a) Pola lilin berikut gating system, (b) cetakan keramik dalam proses pembongkaran setelah penuangan, (c) produk akhir.

langsung dipotong dari saluran masuknya [Gambar 6.8(g)], tidak memerlukan proses permesinan akhir. Metode ini dipakai untuk mengecor peralatan yang presisi, seperti perhiasan, mahkota gigi (dental crown), sudu turbin, dan lain lain. Gambar 6.9 menunjukkan proses pengecoran presisi untuk membuat sudu.



GAMBAR 6.10 Proses pengecoran kontinu.

Sumber: Diadaptasi dari http://www.ssab.com/Global/SSAB/Brochures/en/Images_steelbok/Continuous_casting.jpg.

luar sudah keras, sedangkan bagian dalam masih dalam kondisi lumpur). Logam setengah beku ini ditarik dari bawah sehingga membentuk lempengan atau batangan panjang (bergantung pada bentuk cetakan) yang secara kontinu didinginkan dalam perjalanan turun. Di akhir proses, logam sudah membeku, tetapi masih sangat panas. Kemudian, logam dipotong menggunakan pemotong oksigen menjadi potongan berukuran 11–12 meter. Bentuk produk bergantung pada bentuk cetakan. Bila cetakan berbentuk persegi panjang maka akan dihasilkan lempengan (*slab*)—lihat Gambar 6.11. Sementara itu, jika berbentuk bujur sangkar atau lingkaran maka akan dihasilkan billet atau *bloom*. Sepanjang prosesnya, logam didinginkan secara terkendali sehingga komposisi kimia dan sifat mekanisnya relatif seragam di seluruh bagian. Proses pengecoran kontinu dilakukan terautomasi sehingga sangat efisien.

Pengecoran Kontinu

Proses ini merupakan kombinasi antara pengecoran dan pencanaan, yang umumnya digunakan sebagai bagian akhir dari proses ekstraksi untuk menghasilkan produk setengah jadi dalam bentuk lempengan tebal (lihat Gambar 6.10). Logam cair hasil pemurnian berada dalam *ladle* (sendok penyerok) dan dialirkan melalui sebuah nozel menuju *tundish*. *Tundish* adalah wadah antara yang dirancang sedemikian rupa sehingga ketinggian logam cair dan kecepatan alir dari *ladle* ke cetakan terjadi tanpa putus. Dari *tundish*, logam cair masuk ke cetakan terbuka yang dilengkapi dengan sistem pendingin sehingga logam cair berubah menjadi logam yang setengah beku (bagian



(a)



(b)

GAMBAR 6.11 (a) Proses pengecoran kontinu dan (b) produk pengecoran kontinu.

Sumber: Diadaptasi dari Casting Quality, "Investment Casting Process", <http://www.castingquality.com/casting-technology/investment-casting-tech/investment-casting-process.html> [Gambar 6.11(a)] dan https://www.metaltek.com/sites/default/files/cc_0.jpg [Gambar 6.11(b)].

6.3 Pembentukan Padat

Pembentukan padat (*bulk forming*) dilakukan pada bahan setengah jadi dalam bentuk padat, seperti lempengan (*slab*), *billet*, atau batangan (*bar*). Dalam prosesnya, tegangan yang besar harus dilibatkan. Tegangan ini harus melebihi tegangan luluh (*yield strength*) dari material yang diproses. Semua material logam yang akan mengalami proses pembentukan harus memiliki keuletan yang tinggi sehingga tidak retak atau pecah pada saat proses berlangsung.

Ada dua macam proses pembentukan, yaitu:

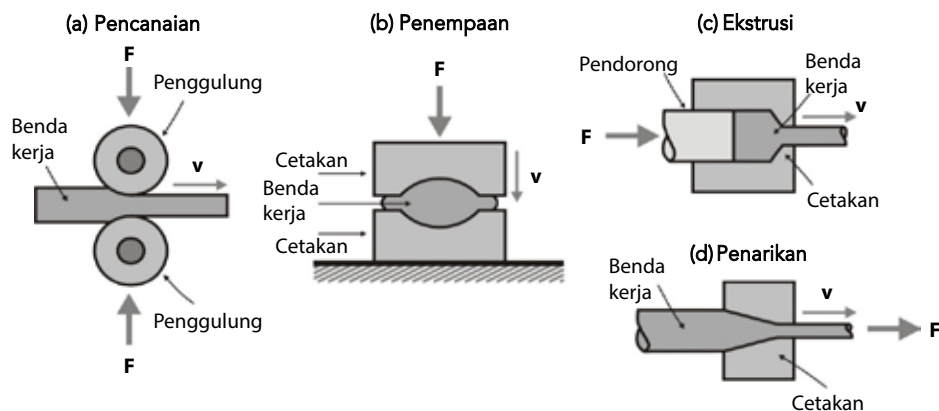
1. Proses pembentukan dingin (*cold forming*), yaitu bila proses dilakukan pada temperatur kamar.
2. Proses pembentukan panas (*hot forming*), yaitu jika proses dilakukan pada temperatur tinggi, di atas temperatur rekristalisasi.

Rekristalisasi adalah proses kembalinya bentuk butir logam dari terelongasi akibat deformasi menjadi bulat. Temperatur di mana proses rekristalisasi selesai dalam waktu satu jam dikenal dengan sebutan **temperatur rekristalisasi**. Pada proses pembentukan panas dan karena ada bantuan temperatur, logam dapat dideformasi lebih besar dan tegangan yang diperlukan relatif lebih rendah daripada proses pembentukan dingin. Namun pada proses ini, lapisan oksida (kerak) mudah terbentuk di permukaan logam yang diproses. Sebaliknya pada proses pembentukan dingin, walau derajat deformasi lebih rendah, permukaan logam yang diproses tetap mulus dan logam akan mengalami peningkatan sifat mekanis yang cukup signifikan.

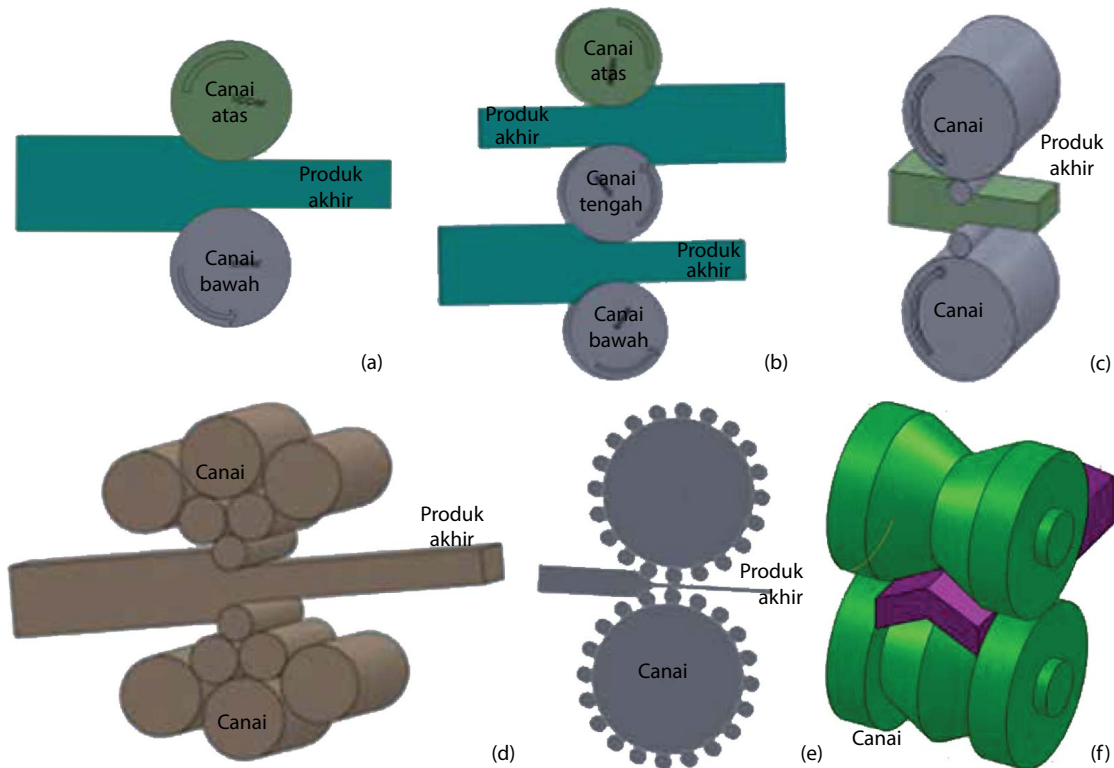
Pembentukan padat meliputi pencanaian (*rolling*), penempaan (*forging*), ekstrusi, dan penarikan (*drawing*)—yang diilustrasikan oleh Gambar 6.12. Proses-proses pembentukan padat ini akan dibahas pada bagian selanjutnya.

Pencanaian

Pencanaian merupakan proses pembentukan padat yang paling banyak digunakan. Pada proses ini, logam dilewatkan di antara dua pencaian (*roll*), di mana akibat tegangan tekan



GAMBAR 6.12 Proses pembentukan padat: (a) Pencanaian (*rolling*), (b) penempaan (*forging*), (c) ekstrusi, dan (d) penarikan (*drawing*).



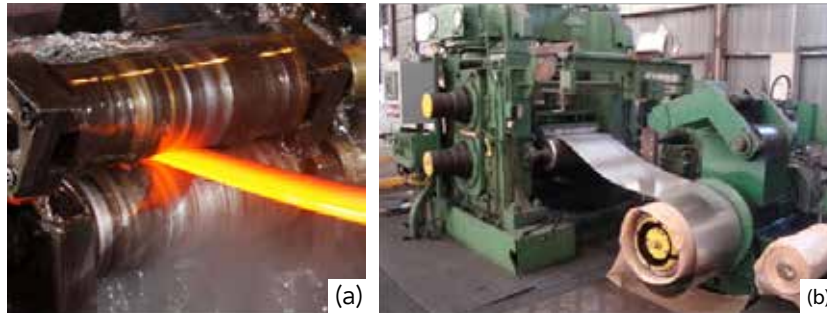
GAMBAR 6.13 Jenis canai: (a) Two-high mill, (b) three-high mill, (c) four-high mill, (d) cluster mill, (e) planetary mill, (f) shape mill.

Sumber: Diadaptasi dari http://14.139.245.214/mfvlab/Rolling_process.php.

yang diberikan oleh pencanai terjadi pengurangan ketebalan logam. Jenis proses pencanaian dibagi berdasarkan jumlah atau letak *roll mill* pada mesin yang ditunjukkan pada Gambar 6.13. Pencanaian dingin [lihat Gambar 6.14(a)] digunakan untuk memproduksi lembaran logam dan foil dengan kualitas permukaan yang baik. Beberapa bentuk profil, seperti profil I atau rel kereta juga dapat dibuat dengan proses pencanaian dengan pencanai berprofil atau berlekuk. Selain canai dingin, terdapat pula canai panas yang bertujuan untuk mendapatkan ketebalan yang lebih tipis, tetapi tetap memiliki sifat mekanis yang sama seperti material awal. Proses canai panas dapat dilihat pada Gambar 6.14(b).

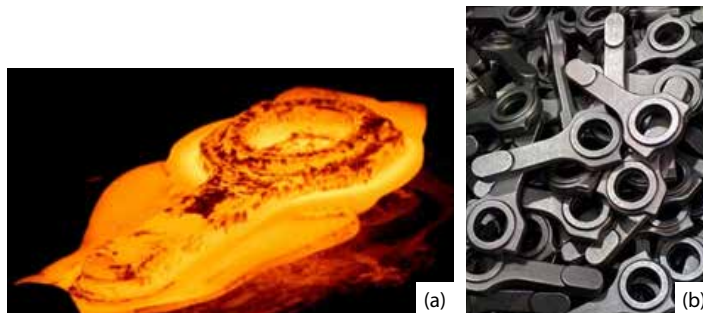
Penempaan

Penempaan adalah pengubahan bentuk logam yang umumnya dilakukan pada temperatur tinggi dengan memberikan penekanan dalam beberapa tahap. Penempaan dapat diklasifikasikan menjadi penempaan dengan **cetakan terbuka** dan **cetakan tertutup**. Pada penempaan cetakan tertutup, tekanan diberikan melalui sepasang cetakan yang sesuai dengan bentuk akhir yang diinginkan (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.15). Beberapa contoh produk penempaan cetakan tertutup adalah *crankshaft* (poros engkol/"kruk as"), piston *connecting rod* (batang penghubung) lihat Gambar 6.15(b). Pada penempaan cetakan terbuka, cetakan berbentuk sederhana, umumnya datar atau agak bulat. Contoh penempaan cetakan terbuka adalah



GAMBAR 6.14 Proses (a) canai dingin dan (b) canai panas.

Sumber: Diadaptasi dari Digi Drives, "Cold Rolling Mills", http://www.digidrives.in/Cold_Rolling_Mills.html [Gambar 6.14(a)] dan Bonpertuis Steel, "Hot Rolling", <http://www.bonpertuis-steel.com/en/hot-rolling> [Gambar 6.14(b)].



GAMBAR 6.15 Piston connecting rod (a) dalam proses penempaan dan (b) produk jadi.

Sumber: Diadaptasi dari <http://www.motortopia.com/dragracer/features/racing-tech/competition-connecting-rods-1814/>.

pada pembuatan keris atau parang, di mana logam dalam keadaan panas dibentuk dengan ditempa dengan dipukul menggunakan martil pemukul dan alas tempa yang berpermukaan datar (lihat Gambar 6.16).

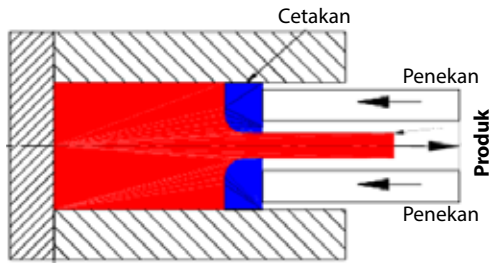
Ekstrusi

Pada proses ekstrusi, batangan logam diberi tegangan tekan oleh sebuah penekan dan dilewatkan pada sebuah cetakan sehingga penampang batangan yang keluar berubah sesuai bentuk cetakan. Produk ekstrusi dapat berupa tabung yang sederhana hingga bentuk profil yang rumit. Sebagian besar logam diekstrusi pada temperatur tinggi karena besarnya tekanan yang diperlukan. Berdasarkan arah penekanan, ekstrusi dibagi dua, yaitu **ekstrusi langsung** dan **ekstrusi tidak langsung**. Pada ekstrusi langsung [Gambar 6.12(c)], logam diletakkan ke dalam wadah dan kemudian pelat penekan ditempelkan pada logam dan didorong ke arah cetakan sehingga produk keluar dari cetakan



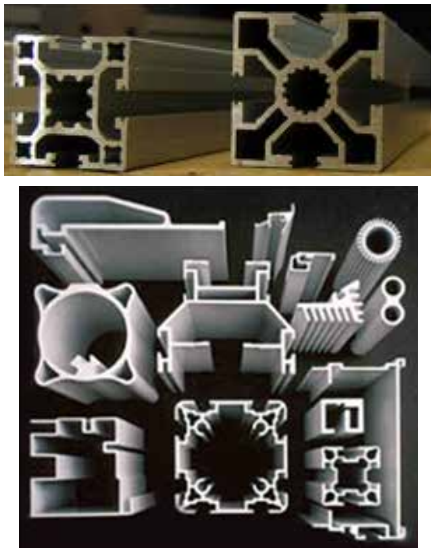
GAMBAR 6.16 Penempaan cetakan terbuka.

Sumber: Diadaptasi dari All Metals & Forge Group, <http://www.steelforge.com/metals-manufacturing-newsletter/metals-manufacturing-outlook-jan-2015/>.



GAMBAR 6.17 Ekstrusi tidak langsung.

Sumber: Diadaptasi dari http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Manufacturing/Extruding.html.



GAMBAR 6.18 Beberapa contoh produk ekstrusi dari aluminium.

Sumber: Diadaptasi dari <http://www.traderscity.com/board/products/catalog.php?searchphotos=Aluminum%20Extrusion%20Fabrication%20Machining%20Anodizing>.

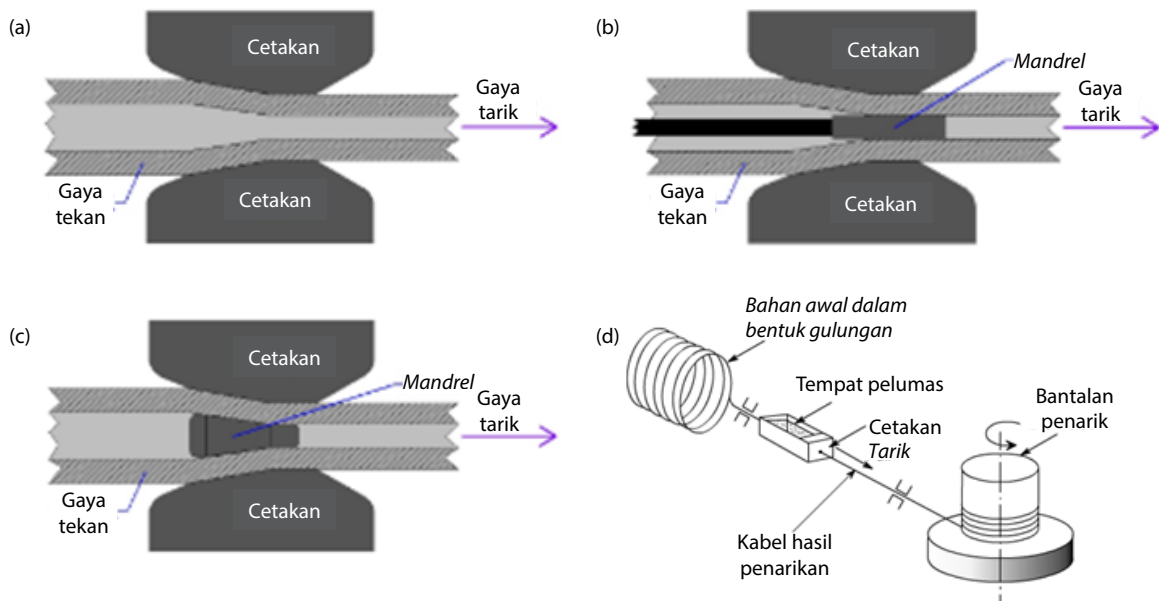
searah dengan arah penekanan. Pada ekstrusi tidak langsung (Gambar 6.17), penekan dan cetakan ditekan pada logam sehingga produk keluar pada arah yang berlawanan dengan arah penekanan. Untuk membuat tabung berongga, sebuah *mandrel* disambungkan dengan penekan. Beberapa contoh produk ekstrusi dapat dilihat pada Gambar 6.18.

Penarikan

Pada proses penarikan [Gambar 6.12(d)], batangan logam ditarik melewati sebuah cetakan yang tirus. Terjadi pengecilan penampang yang diikuti dengan pertambahan. Umumnya, proses penarikan dilakukan dalam beberapa tahap melewati beberapa cetakan hingga diperoleh dimensi penampang yang diinginkan (Gambar 6.19). Proses ini umum digunakan dalam pembuatan kawat dan batangan (lihat Gambar 6.20).

Pembentukan Lembaran Logam

Terdapat banyak jenis pembentukan lembaran logam (*sheet metal forming*) yang menghasilkan beragam produk. Kata "lembaran logam" merujuk pada rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi, seperti tampak pada Gambar 6.21. Lembaran logam umumnya merupakan hasil pencanaian yang tersedia dalam bentuk gulungan. Ada dua istilah lembaran logam yang sering digunakan, yaitu **lembaran (*sheet*)** dan **pelat (*plate*)**. Lembaran memiliki ketebalan $\frac{1}{4}$ inci



GAMBAR 6.19 Proses penarikan (*drawing*): (a) Penarikan tabung tanpa mandrel, (b) Penarikan tabung dengan mandrel tetap, (c) Penarikan tabung dengan mandrel bebas, (d) Penarikan kawat

Sumber: Diadaptasi dari http://thelibraryofmanufacturing.com/metal_drawing.html.

pembentukan lembaran logam umumnya dilakukan pada temperatur kamar (pembentukan dingin), tetapi dapat juga dilakukan pada temperatur tinggi (pembentukan panas atau hangat), khususnya bila benda kerjanya adalah pelat. Dalam pembentukan lembaran logam, tidak diharapkan terjadinya perubahan ketebalan dalam beberapa proses seperti penarikan dalam (*deep drawing*)—tetapi hal tersebut sering diabaikan. Proses pembentukan lembaran logam umumnya merupakan produksi massal dan produknya memiliki kekuatan tinggi, permukaan yang baik, dan toleransi ukuran yang akurat. Klasifikasi proses pembentukan lembaran logam dapat dilihat pada Gambar 6.22. Secara umum, pembentukan lembaran logam dibagi dua, yaitu (1) pemotongan dan (2) pembentukan.

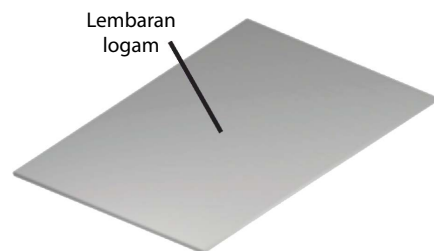


GAMBAR 6.20 Produk penarikan (*drawing*).

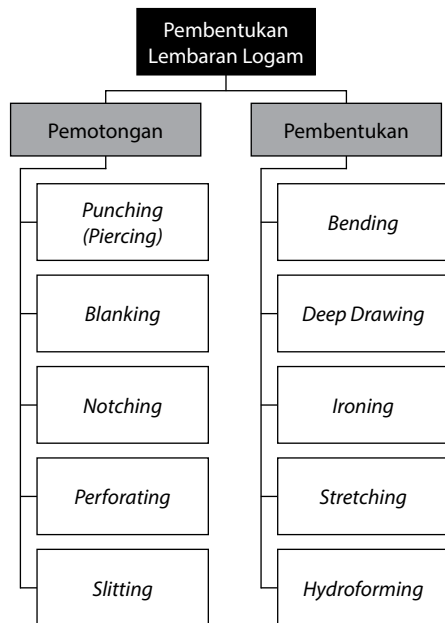
Sumber: Diadaptasi dari <http://www.kennametal.com/en/products/engineered-wear-solutions/engineered-components/metallforming.html>.

Pemotongan

Pada proses pemotongan (*shearing*), lembaran logam dibebani melebihi (atau di atas) kekuatan tariknya. Tegangan yang bekerja di dalam lembaran logam akibat pembebanan adalah tegangan geser. Proses pemotongan menggunakan penekan dan cetakan dengan berbagai sudut



GAMBAR 6.21 Lembaran logam.



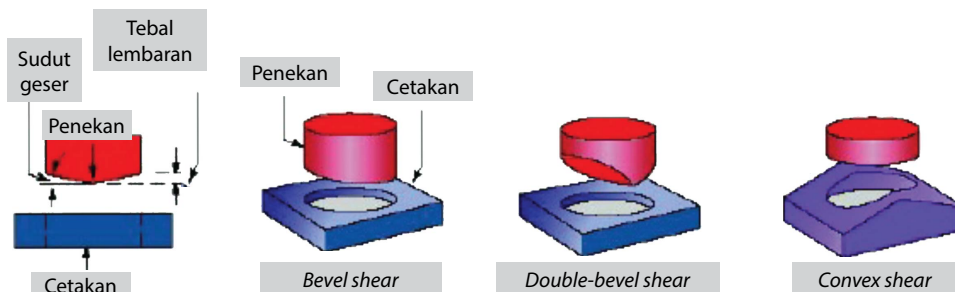
GAMBAR 6.22 Klasifikasi proses pembentukan lembaran logam.

geser (lihat Gambar 6.23). Kualitas tepi potongan ditentukan antara lain oleh jarak ruang (*clearance*) antara penekan dan cetakan. Biasanya, jarak ruang adalah 2–8% dari tebal lembaran. Semakin tebal lembaran, semakin besar jarak ruangnya (bisa mencapai 10%). Umumnya, semakin kecil jarak ruang maka semakin baik kualitas tepi potongan. Ada beberapa jenis proses pemotongan, antara lain *punching*, *blanking*, *notching*, *perforating*, dan *slitting* (Gambar 6.24)

1. *Punching* merupakan proses pemotongan untuk membuat berbagai bentuk lubang pada lembaran logam. Produknya adalah lubang dan material yang terpotong ketika membuat lubang menjadi limbah.
2. *Blanking* adalah kebalikan dari *punching*, di mana lembaran logam yang rata dipotong. Hasil potongannya disebut *blank* dan merupakan produk yang dihasilkan, sedangkan lembaran sisa yang telah berlubang menjadi limbahnya. Ilustrasi produk dan limbah pada proses *punching* dan *blanking* dapat dilihat pada Gambar 6.24.
3. *Notching* adalah proses pemotongan di mana lembaran logam dipotong dari pinggirnya.
4. *Perforating* adalah proses pemotongan banyak lubang kecil yang berdekatan.
5. *Slitting* adalah proses membuat lubang yang tidak sempurna dengan cara membuat celah pada lembaran dan menariknya.

Pada proses pembentukan lembaran, tegangan yang diberikan di bawah tegangan tarik logam. Tidak ada proses pemotongan, tetapi kontur dari lembaran akan berubah sesuai bentuk yang diinginkan. Penekukan (*bending*), penarikan dalam (*deep drawing*), *ironing*, *stretching*, dan *hydroforming* (pembentukan fluida) merupakan beberapa jenis proses pembentukan.

1. Penekukan (*bending*) adalah proses di mana lembaran logam ditekuk secara seragam terhadap sumbu linear. Ada beberapa jenis proses penekukan, yaitu

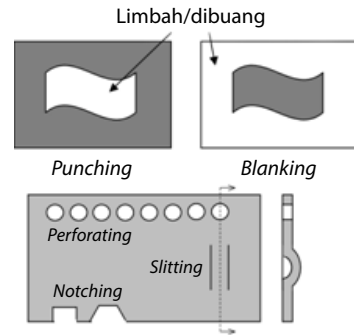


GAMBAR 6.23 Penekan dan cetakan pada proses pemotongan. Sudut geser bergantung pada ketebalan lembaran.

Sumber: Diadaptasi dari Nikhil R. Dhar, Department Industrial and Production Engineering BUET.

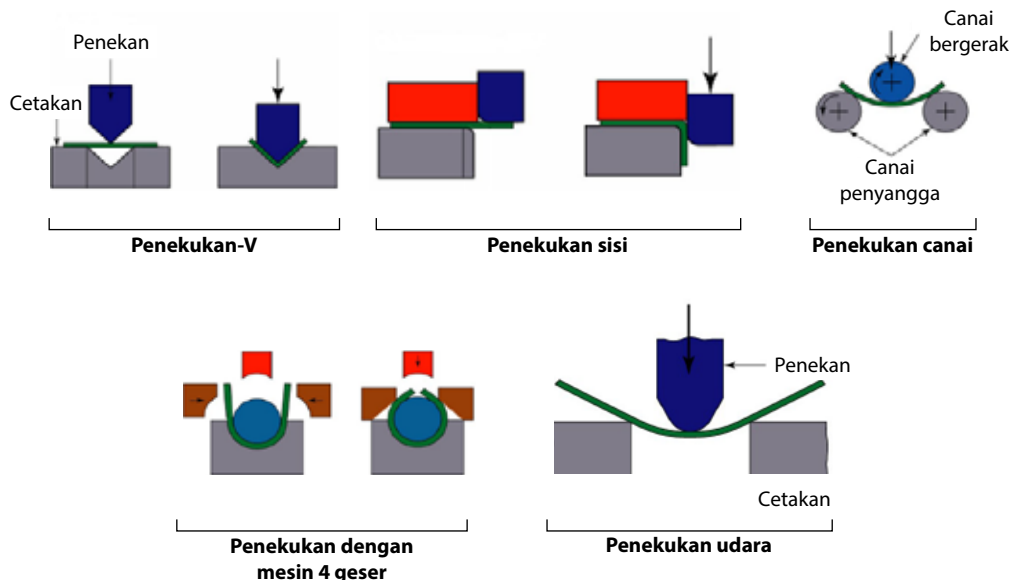
penekukan-V, penekukan sisi, penekukan canai, penekukan dengan mesin 4 geser, dan penekukan udara (Gambar 6.25).

2. Penarikan dalam (*deep drawing*) adalah proses pembentukan *blank* berbentuk lingkaran menjadi bentuk berlubang dengan menggunakan penekan yang mendorong *blank* mengalir ke dalam lubang cetakan (Gambar 6.26).
3. *Ironing* mirip dengan proses penekanan dalam, namun lembaran lebih tebal daripada lebar celah antara penekan dan cetakan sehingga ketebalan lembaran akan berkurang akibat proses (Gambar 6.27). Proses *ironing* akan menghasilkan ketebalan lembaran yang konstan. Semakin kecil lebar celah, semakin besar derajat deformasi *ironing*. Kaleng minuman yang terdiri atas dua bagian (kaleng dan tutup atasnya) dibuat dengan proses penekanan dalam yang dilanjutkan dengan proses *ironing*.
4. *Stretching* mirip dengan proses penekanan dalam, namun *blank* dijepit sehingga tidak dapat mengalir dan bagian yang ditekan oleh penekan akan mengalami peregangan yang besar (Gambar 6.28).
5. *Hydroforming* (pembentukan fluida) menggunakan membran karet "cetakan". Membran karet diberi tekanan yang dikendalikan selama proses pembentukan dengan tekanan maksimum 100 MPa, sedangkan *blank* ditekan oleh penekan (*lihat* Gambar 6.29). Proses ini relatif lebih



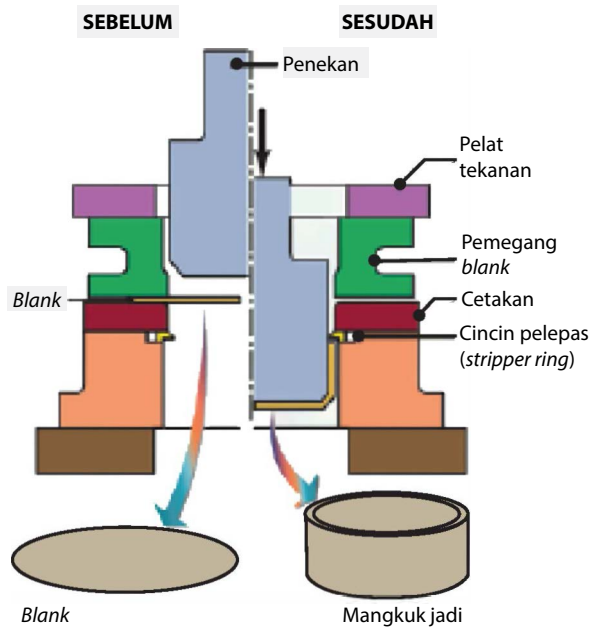
GAMBAR 6.24 Proses *punching*, *blanking*, *perforating*, *notching*, dan *slitting*.

Sumber: Diadaptasi dari Kalpakjian dan Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Edisi ke-5 (Pearson Education, 2008).



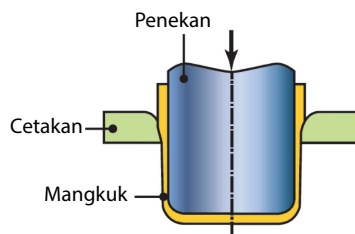
GAMBAR 6.25 Proses penekukan lembaran.

Sumber: Diadaptasi dari Kalpakjian dan Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Edisi ke-5 (Pearson Education, 2008).



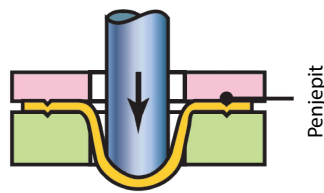
GAMBAR 6.26 Ilustrasi skematis proses penekanan dalam pada blank berbentuk lingkaran. Cincin pelepas (*stripper ring*) berfungsi melepaskan mangkuk yang sudah jadi dari penekan.

Sumber: Diadaptasi dari Kalpakjian dan Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Edisi ke-5 (Pearson Education, 2008).



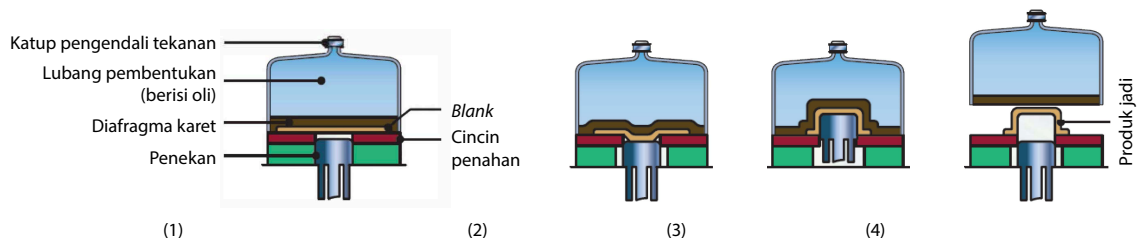
GAMBAR 6.27 Ilustrasi skematis proses *ironing*. Perhatikan bahwa ketebalan dinding mangkuk lebih tebal daripada dasarnya.

Sumber: Diadaptasi dari Kalpakjian dan Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Edisi ke-5 (Pearson Education, 2008).



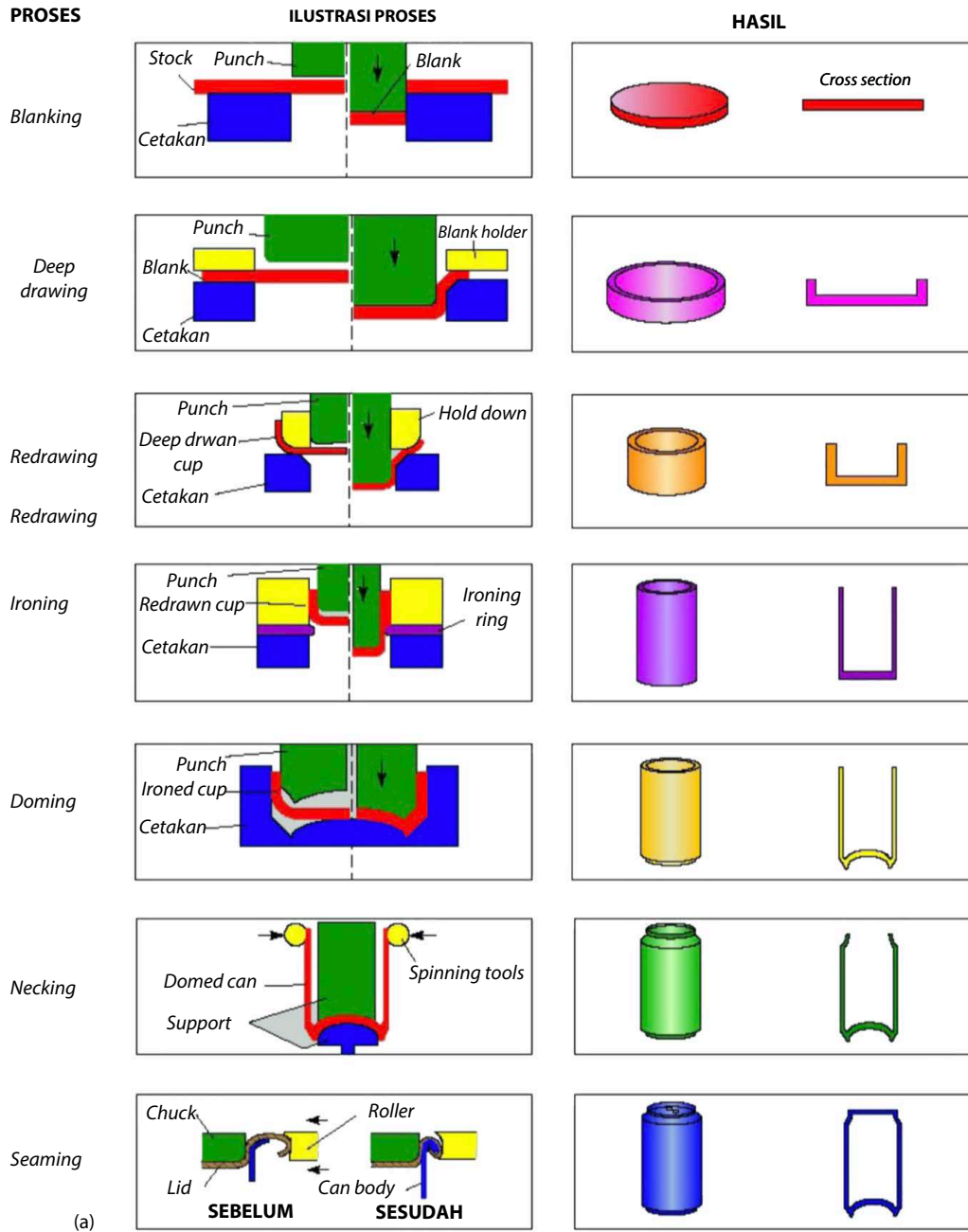
GAMBAR 6.28 Ilustrasi skematis proses *stretching*. Perhatikan bahwa penjepit menghalangi lembaran logam mengalir bebas ke dalam lubang cetakan.

Sumber: Diadaptasi dari Kalpakjian dan Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Edisi ke-5 (Pearson Education, 2008).



GAMBAR 6.29 Prinsip proses *hydroforming* (pembentukan fluida).

Sumber: Diadaptasi dari Kalpakjian dan Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Edisi ke-5 (Pearson Education, 2008).



GAMBAR 6.30 (a) Tahapan proses pembuatan kaleng minuman dua bagian (kaleng dan tutupnya) dan (b) produk jadi dari kaleng minuman.

Sumber: Diadaptasi dari Kalpakjian dan Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Edisi ke-5 (Pearson Education, 2008).

mudah dikontrol untuk mencegah kerutan atau terjadinya robek. Bila didesain dengan teliti, proses *hydroforming* memiliki keunggulan: biaya cetakan yang rendah, operasi yang fleksibel dan mudah, cetakan tidak mudah aus, serta tidak ada kerusakan di permukaan lembaran.

Untuk membuat sebuah produk jadi, proses yang dialami sebuah lembaran logam dapat merupakan sebuah rangkaian yang panjang. Contohnya adalah pembuatan kaleng minuman yang terdiri atas dua bagian, yaitu kaleng dan tutupnya (lihat Gambar 6.30). Proses diawali dengan pemotongan membentuk *blank*. *Blank* kemudian mengalami proses penekanan dalam dan proses *ironing* membentuk kaleng, baru setelah itu bagian bawah dibentuk dan diikuti penekukan tepi atas kaleng. Seluruh proses dilakukan pada temperatur kamar. Dengan parameter proses yang dikendalikan dengan ketat maka diperoleh permukaan produk akhir yang halus.

6.4 Metalurgi Serbuk

Pada proses ini, serbuk logam dipakai sebagai material awal. Tahapan proses **metalurgi serbuk** (*powder metalurgy*—PM), sebagai berikut.

1. Pencampuran serbuk. Serbuk dicampurkan dalam sebuah mesin pencampur (*mixer*). Pencampuran dilakukan untuk mencampurkan beberapa jenis serbuk logam murni untuk membentuk paduan, atau menambahkan serbuk pelumas.
2. Kompaksi. Serbuk yang telah dicampur kemudian dikompaksi (ditekan) ke dalam suatu cetakan yang memiliki bentuk sesuai dengan desain yang diinginkan. Tekanan harus dibuat sedemikian hingga agar serbuk dapat menyatu dan memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan bentuknya jika dikeluarkan dari cetakan. Serbuk yang telah dikompaksi dan memiliki bentuk tertentu disebut bakalan (*green*).
3. Sinter. Proses sinter adalah pemanasan bakalan agar terjadi difusi antarserbuk logam sehingga menyatu dan memiliki kekuatan yang tinggi. Dalam beberapa kasus, unsur minor campuran serbuk dapat meleleh pada temperatur sinter—hal ini disebut sinter fasa cair.



GAMBAR 6.31 Berbagai jenis roda gigi yang dibuat dengan proses metalurgi serbuk.

Sumber: Diadaptasi dari Yeh Der Enterprise, Co., Ltd., "Products: Gear Parts 1", <http://www.ydgear.com/metal-gear.htm>.

Jumlah fasa cair harus dibatasi agar komponen dapat mempertahankan bentuknya. Proses kompaksi mempertahankan bentuknya. Proses kompaksi dan sinter juga dapat dikombinasikan dalam satu proses yang sama, di mana proses kompaksi dilakukan pada temperatur tinggi sehingga secara bersamaan sinter terjadi. Proses seperti ini disebut kompaksi panas.

Sebuah komponen dibuat melalui proses metalurgi serbuk umumnya karena (1) didesain untuk memiliki kandungan porositas tertentu dengan tetap mempertahankan densitas yang tinggi seperti material padat; (2) dibuat dari material logam paduan yang unsur-unsurnya memiliki kelarutan terbatas sehingga tidak dapat dipadu melalui proses pengecoran, misalnya

Al-Ti P/M; (3) dibuat dari material logam yang memiliki temperatur lebur yang sangat tinggi; (4) memiliki bentuk yang kecil dan rumit. Beberapa contoh produk metalurgi serbuk dapat dilihat pada Gambar 6.31.

6.5 Perlakuan Panas

Perlakuan panas adalah pemanasan dan pendinginan logam secara terkendali untuk mengubah sifat fisik dan mekanik tanpa mengubah bentuk produk. Perlakuan panas terkadang terjadi tanpa disengaja akibat proses manufaktur yang melibatkan pemanasan dan pendinginan, seperti pengelasan dan pembentukan logam. Perlakuan panas sering diasosiasikan dengan peningkatan kekuatan material, tetapi juga dapat digunakan untuk mengubah kemampuan logam dimanufaktur, misalnya untuk memperbaiki kemampumesinan, memperbaiki kemampubentukan, dan/atau mengembalikan keuletan setelah pembentukan dingin. Jadi, perlakuan panas merupakan bagian dari proses manufaktur yang sangat berperan yang dapat mempermudah proses manufaktur lainnya serta dapat meningkatkan kinerja produk dengan meningkatkan kekuatan atau sifat lainnya yang diinginkan.

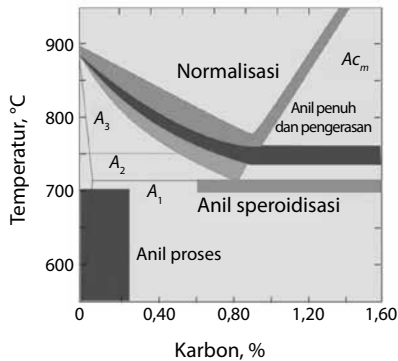
Baja memiliki respons yang baik terhadap perlakuan panas. Baja sangat banyak digunakan untuk berbagai aplikasi sehingga proses perlakuan panasnya sangat beragam. Berdasarkan tujuannya, perlakuan panas pada baja dapat diklasifikasinya menjadi (1) pelunakan, (2) pengerasan, dan (3) modifikasi material.

Pelunakan

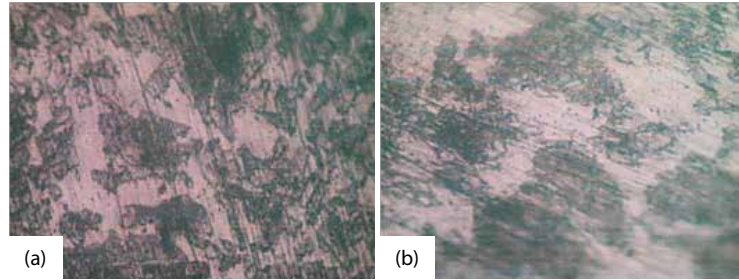
Pelunakan dilakukan untuk menurunkan kekuatan atau kekerasan, menghilangkan tegangan sisa, memperbaiki ketangguhan, mengembalikan keuletan, atau mengubah sifat elektromagnetik baja. Mengembalikan keuletan atau menghilangkan tegangan sisa sangat diperlukan pada proses pengubahan bentuk dingin dengan derajat deformasi yang besar, misalnya pada proses pencanaian atau penarikan kawat. Perlakuan panas untuk tujuan pelunakan antara lain adalah anil penuh (*full annealing*), sferoidisasi, normalisasi, dan *temper* (*austemper* atau *martemper*). Kisaran temperatur beberapa perlakuan panas pada baja dapat dilihat pada Gambar 6.32.

Anil Penuh

Anil penuh (*full annealing*) adalah proses pemanasan pada temperatur 50°C di atas garis A_3 atau A_{cm} (lihat Gambar 6.32) dan ditahan selama beberapa waktu untuk mengubah seluruh fasa mejadi austenit. Kemudian, proses dilanjutkan dengan pendinginan di dalam tungku secara terkendali dan perlahan dengan laju $20^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ hingga mencapai 50°C —masuk ke daerah ferit dan sementit, dan dilanjutkan dengan pendinginan udara. Struktur mikro akhir pada proses ini adalah perlit kasar dan ferit (untuk baja hipoeutektoid) atau perlit kasar dan sementit (untuk baja hipereutektoid), sehingga baja menjadi lunak dan ulet (lihat Gambar 6.33).



GAMBAR 6.32 Diagram fase Fe-C beserta kisaran temperatur perlakuan panas.



GAMBAR 6.33 Baja NST 37-2 (a) sebelum dan (b) setelah dianil penuh pada temperatur 910°C selama 90 menit kemudian dilanjutkan dengan pendinginan udara yang menunjukkan struktur ferit kasar dengan perlit.

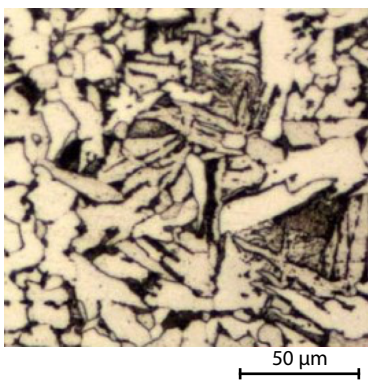
Sumber: Diadaptasi dari Fadare, D.A., T.G. Fadara, dan O. Y. Akanbi, *J. of Min. Mat. Char. Eng.*, vol. 10, No. 3 (2011), hlm. 299–308.

Normalisasi

Normalisasi merupakan proses pemanasan pada temperatur lebih dari 60°C di atas garis A_3 atau A_{cm} (lihat Gambar 6.32) dan ditahan selama beberapa waktu sehingga seluruh fasa berubah menjadi austenit. Kemudian, didinginkan di udara sehingga struktur mikro akhir adalah perlit halus dan ferit (untuk baja hipoeutektoid) atau perlit halus dan sementit (untuk baja hipereutektoid)—lihat Gambar 6.34. Sifat akhir material adalah lunak di mana tingkat kelunakan bergantung pada temperatur udara pada saat pendinginan.

Proses normalisasi jauh lebih murah daripada proses anil penuh karena tidak ada biaya untuk pendinginan terkendali di dalam tungku. Perbedaan utama antara anil penuh dan normalisasi

adalah produk yang dianil penuh memiliki tingkat kelunakan dan kemampumesinan yang seragam di seluruh bagian karena proses pendinginannya terkendali. Pada proses normalisasi, tingkat kelunakan bergantung pada geometri produk—karena proses pendingin udara tidak seragam di tiap bagian produk. Hal ini tidak diinginkan bila produk masih harus diproses permesinan. Jadi, bila produk harus mengalami proses permesinan lebih lanjut maka sebaiknya yang dipilih adalah proses anil penuh.



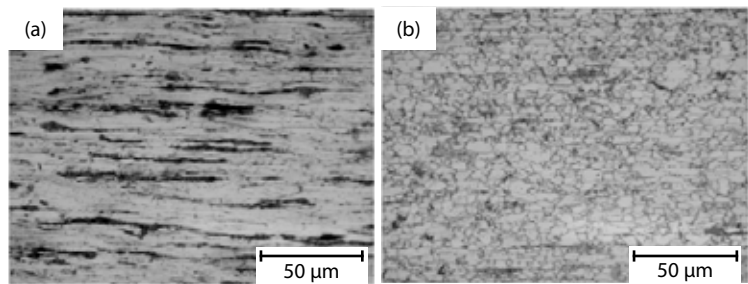
GAMBAR 6.34 Baja 245NB (0.13C-0.76Mn-0.019Si-0.011P-0.005S-0.042Al) setelah dinormalisasi pada temperatur 960°C selama 10 menit menunjukkan struktur poligonal ferit dan perlit.

Sumber: Diadaptasi dari Pitakorraras, Tangroekwarasakul, dan Chokechaitananan, *J. of Met. Mat. Min.*, Vol. 20, No. 3 (2010), hlm. 37–41.

Anil Proses

Anil proses digunakan pada komponen baja karbon rendah yang telah dikeraskan. Proses ini akan membuat komponen cukup lunak untuk mengalami pembentukan dingin lebih lanjut tanpa perpatahan. Anil proses dilakukan dengan memanaskan hingga temperatur tepat di bawah garis A_1 (lihat Gambar 6.32), yaitu pada sekitar 700°C dan ditahan cukup lama sehingga fasa ferit dapat mengalami rekristalisasi,

kemudian dilanjutkan dengan pendinginan di udara. Karena material tetap berada dalam fasa yang sama selama proses ini, perubahan yang terjadi pada struktur mikro hanyalah pada ukuran, bentuk, dan distribusi fasa serta butir (lihat Gambar 6.35). Proses ini lebih murah dari pada anil penuh atau normalisasi karena material tidak dipanaskan terlalu tinggi dan pendinginannya tidak memerlukan tungku.



GAMBAR 6.35 Baja 0.056C-0.53Si1.46Mn (0.017P-0.005S-0.032Al-0.09Cr-0.03Mo-0.08Cu-0.01Ti-0.1V). (a) Setelah canai dingin dengan reduksi 85%. (b) Dianil pada temperatur 650°C selama 2 jam menunjukkan butir ferit dan perlit yang terekristalisasi.

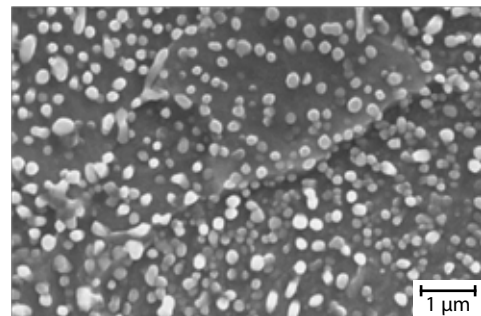
Sumber: Diadaptasi dari Ahmad, E., F. Karim, K. Saeed, T. Manzoor, dan G.H. Zahid, "ISAM Proceeding 2013", Islamabad, Pakistan.

Anil Penghilangan Tegangan

Anil penghilang tegangan (*stress relief annealing*) digunakan untuk menurunkan tegangan sisa pada produk cor yang besar, struktur yang dilas, atau komponen yang telah mengalami pengerjaan dingin. Komponen tersebut cenderung memiliki tegangan internal akibat siklus pemanasan dan pendinginan, ataupun pengerasan pengerjaan. Proses melibatkan pemanasan hingga temperatur mencapai 600–650°C dan ditahan cukup lama (biasanya 1 jam atau lebih) dan kemudian didinginkan perlahan di udara.

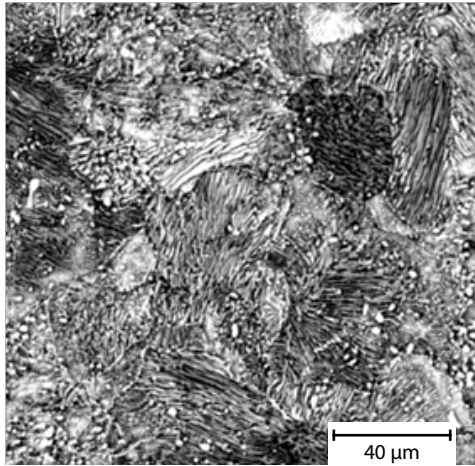
Speroidisasi

Speroidisasi adalah proses anil untuk baja karbon tinggi ($C > 0,6\%$) yang akan dimesin atau dibentuk dingin setelahnya. Proses dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu (1) memanaskan komponen pada temperatur tepat di bawah garis A_1 dan ditahan dalam waktu yang lama diikuti dengan pendinginan lambat; (2) menaikkan dan menurunkan temperatur beberapa kali sedikit di atas dan sedikit di bawah garis A_1 , misalnya antara 700 dan 750°C kemudian dilanjutkan dengan pendinginan lambat; (3) untuk baja perkakas dan baja paduan, pemanasan dilakukan pada temperatur 750–800°C dan ditahan selama beberapa jam, diikuti dengan pendinginan lambat. Keseluruhan cara ini menghasilkan struktur mikro yang terdiri atas sementit berbentuk bulat kecil (*sferoid*) yang terdispersi di dalam matriks ferit (lihat Gambar 6.36). Struktur mikro ini memperbaiki kemampuan permesinan, khususnya pada proses pemotongan kontinu, seperti pengeboran dan pembubutan. Speroidisasi juga meningkatkan ketahanan material terhadap abrasi.



GAMBAR 6.36 Baja 100CrMnSi6-4 [0,94C-0,65Si-1,16Mn-1,54Cr-0,03Ni-0,026Al-0,02Cu (%)] disperoidisasi dengan pemanasan pada temperatur 780°C selama 15 detik, didinginkan udara hingga 680°C, dan siklus ini diulang 3 kali, yang menghasilkan struktur sementit berbentuk bulat halus dengan matriks ferit.

Sumber: Diadaptasi dari Hauserova, D., J. Dlouhy, Z. Novy, dan J. Zrník, "Comat 2012 Proceeding", 21–22 November 2012, Plzen, Republik Cheska.



GAMBAR 6.37 Baja perlit (0.83C-0.5Mn-0.1Cr-0.15Ni-0.3Si-0.025P) setelah dilakukan pengerasan pencelupan dan temper pada temperatur 400°C menunjukkan pembentukan struktur Troostite.

Sumber: Diadaptasi dari Grygier, D., M. Rutkowska, R. Jasinski, dan W. Dudzinski, "The Structural and Strength Changes Resulting from Modification of Heat Treatment of High Carbon Steel", *Arch. Metall. Mater.*, Vol. 61, No. 2B (2016), hlm. 971–976, Wrocław, Polandia.

Temper

Temper adalah proses pelunakan yang dilakukan pada komponen yang telah mengalami pengerasan pencelupan. Baja yang dikeraskan dengan cara pencelupan umumnya terlalu getas karena struktur mikronya terdiri atas martensit. Kegetasan ini perlu dikurangi dengan melakukan *temper*. *Temper* menghasilkan karakteristik yang merupakan kombinasi dari kekerasan, keuletan, ketangguhan, kekuatan, dan stabilitas struktur mikro yang baik.

Mekanisme *temper* bergantung pada jenis baja dan temperatur *temper*. Martensit adalah struktur yang metastabil. Ketika martensit dipanaskan, atom karbon yang terperangkap di dalam martensit akan keluar membentuk endapan karbida, dan secara bersamaan martensit dapat bertransformasi menjadi ferit atau sementit. Jadi, terjadi penurunan kekerasan, di mana pada baja perkakas dapat turun 2–4 HRC. Walaupun kekerasan dan kekuatan turun, namun ketangguhan akan sangat meningkat. Pegas adalah salah satu contoh komponen yang membutuhkan ketangguhan yang tinggi sehingga perlu di-*temper*.

Temper dilakukan langsung setelah proses pengerasan pencelupan. Ketika sudah mencapai temperatur 40°C saat dicelup, baja sudah siap untuk di-*temper*. Baja dipanaskan kembali. Ada dua pilihan temperatur *temper*, yaitu sekitar 150–400°C apabila penurunan kekerasan tidak dikehendaki terlalu besar, di mana dihasilkan struktur *troostite* (lihat Gambar 6.37), atau pada temperatur 400–700°C di mana penurunan kekerasan signifikan dan menghasilkan struktur *sorbite* yang relatif lunak, namun lebih ulet dan tangguh.

Pemanasan pada *temper* paling baik dilakukan dengan merendam komponen di dalam minyak (untuk pemanasan hingga 350°C) kemudian minyak dipanaskan bersamaan dengan komponen di dalamnya. Untuk pemanasan lebih dari 350°C, larutan garam nitrat yang dapat dipanaskan hingga 650°C paling baik untuk digunakan. Pemanasan menggunakan media fluida seperti ini menjamin peningkatan temperatur komponen secara perlahan dan seragam, untuk menghindari retak. Setelah mencapai temperatur yang diinginkan, temperatur tersebut ditahan selama 2 jam dan kemudian dilakukan pendinginan di udara.

Austemper

Austemper adalah teknik pencelupan. Komponen tidak dicelup langsung untuk membentuk martensit, namun dicelup pada temperatur di atas temperatur pembentukan martensit, yaitu sekitar 315°C. Kemudian, temperatur ditahan selama beberapa waktu sehingga seluruh bagian komponen mencapai temperatur tersebut, dan austenit berubah menjadi

bainit (Gambar 6.38). Bainit cukup tangguh sehingga tidak memerlukan proses *temper* lagi dan hampir tidak ada kecenderungan pembentukan retak.

Pengerasan

Pengerasan Pencelupan

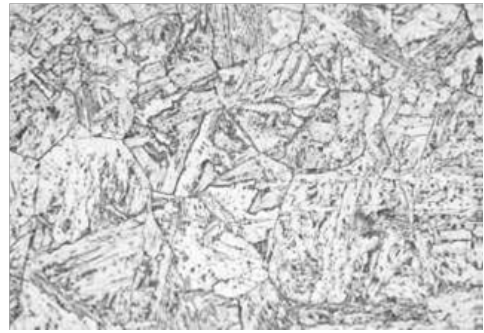
Pengerasan baja dilakukan untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan aus. Satu syarat agar dapat terjadi pengerasan adalah kandungan karbon dan unsur paduan yang cukup. Bila kandungan karbon cukup banyak, baja dapat langsung dikeraskan. Bila tidak cukup banyak karbonnya maka permukaan benda harus ditambah kandungan karbonnya dengan cara pengerasan difusi permukaan.

Kekerasan baja berbanding lurus dengan kandungan karbonnya. Pengerasan pada baja terjadi karena perubahan struktur kristal dari **kubik pemusatan sisi** (*face centered cubic*—FCC) pada daerah austenit ketika dipanaskan pada temperatur di atas A_3 atau A_{cm} menjadi tetragonal setelah dicelup secara cepat ke temperatur ruang. Fasa yang memiliki struktur tetragonal ini adalah **martensit**, yang bersifat sangat kuat dan keras, namun juga getas. Semakin cepat pendinginannya, semakin tinggi kekerasan yang diperoleh. Jadi, proses perlakuan panas pengerasan dilakukan dengan cara pemanasan hingga temperatur di atas A_3 atau A_{cm} dan kemudian dicelupkan dengan cepat ke dalam media pendingin.

Martensit adalah fase terkeras dan terkuat pada baja, namun juga merupakan fasa paling getas. Kekerasannya bergantung pada kadar karbon. Semakin tinggi kadar karbon, semakin keras martensit. Struktur mikro dari martensit terlihat seperti sekumpulan jarum pendek-pendek. Pada kandungan karbon yang rendah, martensit berbentuk bilah (*lath*), sedangkan pada kandungan karbon yang tinggi martensit berbentuk pelat (Gambar 6.39).

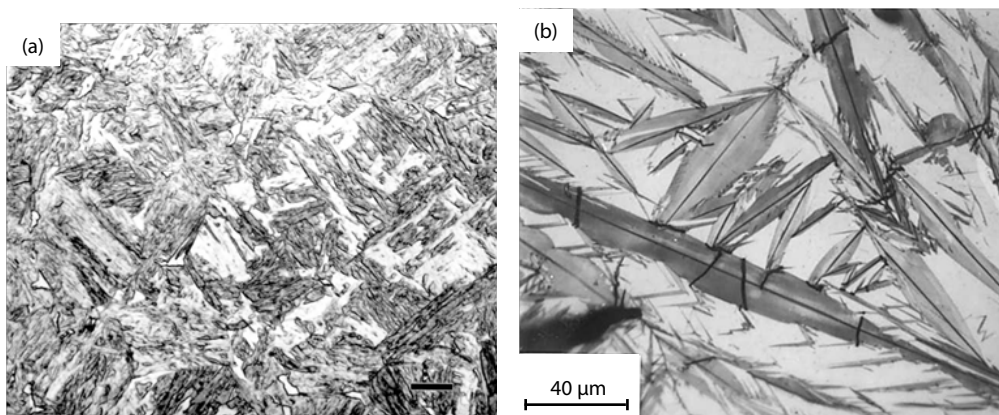
Kemampukerasan (*hardenability*) adalah kedalaman pengerasan yang diperoleh, yang bergantung pada jenis baja dan kandungan unsur paduan di dalamnya. Baja dengan kandungan karbon yang sama, namun dengan kandungan unsur paduan yang berbeda, bila didinginkan dengan kecepatan pendinginan yang sama akan memperoleh kekerasan maksimum yang sama dan dengan kedalaman pengerasan akan berbeda. Oleh karena itu, salah satu alasan untuk membuat baja paduan adalah bukan hanya untuk meningkatkan kekerasannya, namun juga untuk meningkatkan kemampukerasannya—yaitu kemudahan untuk mendapatkan kekerasan maksimum di seluruh bagian material.

Biasanya, ketika baja panas didinginkan secara cepat, sebagian besar pendinginan terjadi di permukaan sehingga permukaan akan mengalami pengerasan. Pengerasan kemudian akan menjalar ke dalam material. Unsur paduan membantu proses penjarangan pengerasan ke dalam material.



GAMBAR 6.38 Struktur bainit yang terdapat pada baja dengan kandungan 0,038C- 0,49Si- 1,45Mn-0,042Nb- 0,0018-0,4Ni, setelah dipanaskan pada 1.000°C selama 5 menit, kemudian dicelup pada temperatur 480°C dan ditahan selama 15 menit.

Sumber: Diadaptasi dari Shang Cheng-jia, Nie Yi, He Xin-lai, Hou Hua-xin, Hao Sen, dan Yu Gong-li, "Intermediate Transformation Structure and Mechanical Properties of High Strength Low Carbon Bainite Steel".



GAMBAR 6.39 (a) Martensit bilah pada baja paduan 8115 (0,13%C) setelah austenisasi 925°C dan dicelup air; (b) Martensit pelat pada baja 1.86%C.

Sumber: Diadaptasi dari (a) Voort G.V., "Martensite and the Control of Retained Austenite", <http://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/1391-martensite-and-the-control-of-retained-austenite.html> (2014) dan (b) Krauss G., "Martensite in Steel: Strength and Structure", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 273–275 (1999): hlm. 40–57.

Dengan demikian, baja paduan tidak terlalu membutuhkan kecepatan pendinginan yang sangat tinggi yang dapat menyebabkan distorsi bentuk dan menyebabkan retak. Dengan demikian, komponen tebal juga dapat dikeraskan seragam di seluruh bagian.

Beberapa media pendinginan yang sering digunakan adalah sebagai berikut.

1. **Air.** Air adalah media pendinginan yang baik dan banyak digunakan. Ketika baja panas dicelupkan ke dalam air, air yang bersentuhan dengan baja akan segera menguap membentuk gelembung udara sehingga mengurangi kontak langsung baja dengan air. Hal ini memperlambat pendinginan sampai gelembung udara pecah dan air dapat kembali bersentuhan langsung dengan baja. Untuk mencegah pembentukan gelembung udara, air perlu diaduk (diagitasi). Perlu diperhatikan bahwa air bersifat korosif dan pendinginan yang cepat dapat menyebabkan distorsi atau retak.
2. **Air Garam.** Air garam adalah media pendingin yang lebih cepat dari air biasa karena gelembung lebih mudah pecah. Namun demikian, air garam lebih korosif sehingga komponen harus segera dibilas sesudahnya.
3. **Minyak/oli.** Minyak digunakan untuk kecepatan pendinginan yang lebih rendah. Karena minyak memiliki titik didih yang sangat tinggi, perubahan dari awal pembentukan martensit hingga selesai terjadi dengan lambat dan mengurangi kemungkinan terjadinya retak. Pencelupan ke dalam minyak dapat menyebabkan asap, tumpahan, dan kadang-kadang bahaya kebakaran.
4. **Polimer.** Media pencelupan polimer umumnya terdiri atas campuran glikol dan air. Pencelupan ke dalam polimer menghasilkan kecepatan pendinginan antara air dan minyak. Kecepatan pendinginan dapat diatur dengan komposisi air dan glikol yang bervariasi. Pencelupan dengan polimer dapat menghasilkan produk dengan konsistensi karakteristik yang baik. Akan tetapi, konsistensi hasil ini hanya dapat diperoleh bila kandungan polimer dimonitor dengan ketat.

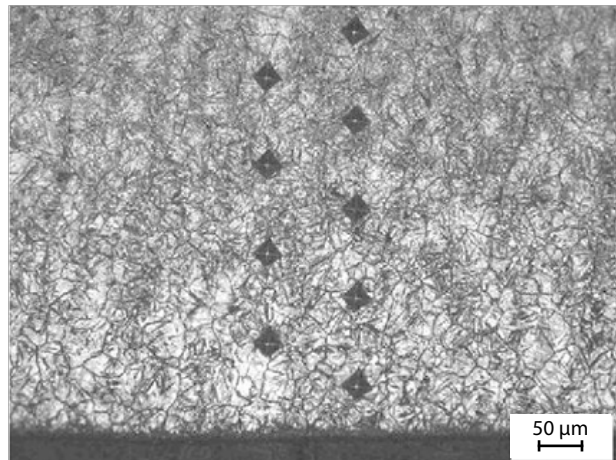
5. **Pencelupan kriogenik.** Pencelupan kriogenik dilakukan untuk memastikan tidak ada **austenit sisa**. Jumlah martensit yang terbentuk saat pencelupan merupakan fungsi tercapainya temperatur terendah di seluruh bagian komponen. Baja karbon sedang dan baja paduan rendah umumnya akan bertransformasi menjadi 100% martensit jika dicelup ke dalam temperatur kamar. Akan tetapi, baja karbon tinggi dan baja paduan tinggi masih memiliki austenit sisa pada pencelupan ke temperatur kamar. Austenit sisa ini menyebabkan penurunan kekerasan dan kekuatan, serta ketidakstabilan dimensi dan retak. Untuk itu, pencelupan kriogenik dilakukan, misalnya menggunakan helium cair (-269°C), nitrogen cair (-180°C), atau es kering (-75°C) sehingga seluruh austenit akan bertransformasi menjadi martensit. Namun demikian, kejutan temperatur yang besar dapat menyebabkan retak pada komponen.

Pengerasan Difusi Permukaan

Kandungan karbon pada baja menentukan apakah baja tersebut dapat langsung dikeraskan atau tidak. Sebagai contoh, jika kandungan karbon lebih rendah dari 0,25% maka alternatifnya adalah dengan meningkatkan kandungan karbon di permukaan. Setelah itu, komponen dapat dikeraskan dengan pemanasan dan pencelupan, namun tentu saja pengerasan hanya diperoleh di permukaan, bukan di bagian dalam, karena kandungan karbon yang cukup hanya terdapat di permukaan (*lihat Gambar 6.40*). Hal ini terutama dilakukan pada komponen yang membutuhkan kekerasan permukaan yang tinggi sehingga tahan aus, namun bagian dalam yang tangguh sehingga memiliki ketangguhan impak yang tinggi, seperti roda gigi. Beberapa teknik pengerasan difusi permukaan adalah karburisasi, nitridasi, dan karbonitridasi (hanya karburasi yang akan dibahas pada bagian ini—ed.).

Karburisasi adalah proses menambahkan karbon ke permukaan baja. Hal ini dilakukan dengan mengekspos baja pada atmosfer yang kaya karbon pada temperatur tinggi sehingga terjadi difusi karbon ke permukaan baja. Difusi karbon ke permukaan baja hanya dapat terjadi apabila baja memiliki kandungan karbon yang rendah—karena difusi terjadi dengan prinsip perbedaan konsentrasi. Jika baja karbon tinggi dipanaskan pada tungku udara, karbon cenderung akan berdifusi keluar dari permukaan, yang menyebabkan dekarburisasi. Beberapa jenis karburisasi adalah sebagai berikut.

1. **Karburisasi padat.** Komponen baja dimasukkan ke dalam media karbon padat (misalnya, serbuk arang) dan kemudian dipanaskan di dalam tungku selama 12–72 jam pada temperatur 900°C . Pada temperatur ini,



GAMBAR 6.40 Baja P20 (0.35C-0.65Si-0.80Mn-1.70Cr-0.40Mo) setelah dikarburisasi gas dan dicelup tampak struktur martensit dan austenit sisa didekat permukaan bagian bawah.

Sumber: Diadaptasi dari Maikon A. dan J. Giuseppe, "Effect of Carburized Steel Hardness on the Surface Roughness and Residual Stresses After Manufacturing Operations", COBEM Proceeding, 15–20 November 2009, Gramado, Brasil.

gas reduktor CO akan dihasilkan. Reaksi reduksi terjadi di permukaan baja yang menghasilkan karbon, kemudian berdifusi ke permukaan baja. Jika kandungan karbon di permukaan sudah cukup, komponen dapat dikeluarkan dan dilanjutkan dengan proses pengerasan. Kandungan karbon pada permukaan dapat mencapai 0,7–1,2% (yang terkandung dari kondisi proses). Kekerasan permukaan dapat mencapai 60–65 HRC. Kedalaman pengerasan dapat mencapai 0,1 mm–1,5 mm. Salah satu masalah pada karburisasi padat adalah sulitnya mengendalikan keseragaman temperatur dan proses pemanasannya yang lama.

2. **Karburisasi gas.** Prinsip karburisasi gas sama dengan karburisasi padat, kecuali bahwa gas CO dipasok secara langsung ke dalam tungku sehingga reaksi reduksi langsung terjadi di permukaan komponen. Proses ini mengatasi masalah yang ditemui pada karburisasi padat. Temperatur lebih terkontrol. Masalah utamanya adalah bagaimana agar gas CO tidak keluar dari tungku sehingga tidak mencemari udara.
3. **Karburisasi cair.** Komponen baja dicelupkan ke dalam media cair kaya karbon, seperti sianida (CN). Masalah keselamatan menjadi perhatian utama pada proses ini sehingga terus dicari jenis cairan yang tidak beracun.

Modifikasi Material

Selain pengerasan dan pelunakan, perlakuan panas juga dapat dilakukan untuk memodifikasi karakteristik material. Proses ini memodifikasi karakteristik material sesuai kebutuhannya pada aplikasi dan untuk memperpanjang umur pakai. Sebagai contoh, penuaan pegas (*spring aging*). Pegas dapat kehilangan gaya tarik pegasnya karena perilaku tidak elastik (*unelastic*) yang menyebabkan pegas kendur dan berubah bentuk seiring dengan berjalannya waktu. Untuk menghindari hal ini, pegas dimasukkan ke dalam tungku bertemperatur 315–375°C selama 2 jam sehingga pegas menjadi kendur atau berubah bentuk. Pengenduran dan perubahan bentuk ini dapat diakomodasi selama perancangan sehingga dapat dikompensasi. Sekali pegas di proses penuaan seperti ini, biasanya tidak akan berubah bentuk lagi.

6.6 Pengelasan

Pengelasan banyak digunakan dalam fabrikasi, perawatan, serta perbaikan komponen dan struktur. Tersedia berbagai metode penyambungan material, namun pengelasan adalah salah satu metode yang paling cepat dan paling mudah. Pengelasan didefinisikan sebagai proses penyambungan logam dengan cara memanaskan hingga temperatur lebur yang menyebabkan logam cair mengalir bersama dan ketika membeku menjadi tersambung. Pengelasan dilakukan mulai dari struktur yang sangat sederhana, seperti pagar rumah hingga reaktor nuklir. Beberapa jenis pengelasan adalah (1) pengelasan busur listrik (*arc welding*); (2) pengelasan gas (*gas welding*); (3) pengelasan tahanan (*resistance welding*); (4) pengelasan padat (*solid state welding*); (5) *soldering* dan *brazing*.

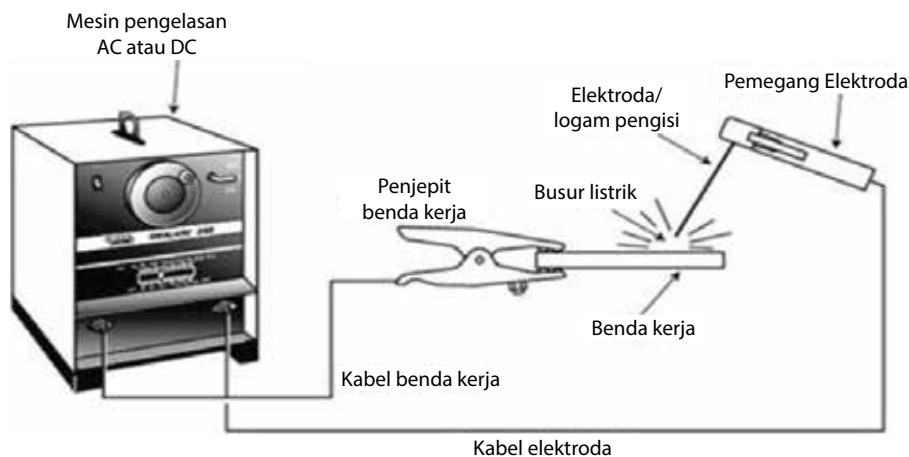
Pengelasan Busur Listrik

Pengelasan busur listrik (*arc welding*) adalah sebuah proses yang menggunakan busur listrik untuk menyambung logam. Teknik ini paling banyak digunakan dalam pengelasan logam. Untuk melakukan pengelasan busur listrik, tiga hal utama dibutuhkan, yaitu **sumber panas**, **logam pengisi**, dan **gas pelindung** (Gambar 6.41). Sumber panasnya adalah busur listrik yang diperoleh dengan mendekatkan dua kutub. Sumber listrik berasal dari mesin pengelasan yang mengalir dari elektroda (logam pengisi) ke logam induk dan ke tanah. Elektroda adalah logam pengisi dengan pelapis. Pengelasan diawali dengan menginisiasi busur listrik dengan mendekatkan elektroda logam berpelapis dengan logam dasar. Begitu busur listrik sudah muncul, panas dari busur listrik tersebut akan melelehkan logam dari ujung elektroda yang mengalir bersama dengan logam dasar yang mencair. Proses ini disebut fusi. Pelapis elektroda akan terbakar membentuk gas yang melindungi daerah las dari kontaminasi. Proses yang dijelaskan ini disebut juga sebagai pengelasan busur listrik logam terlindungi (*shielded metal arc welding—SMAW*).

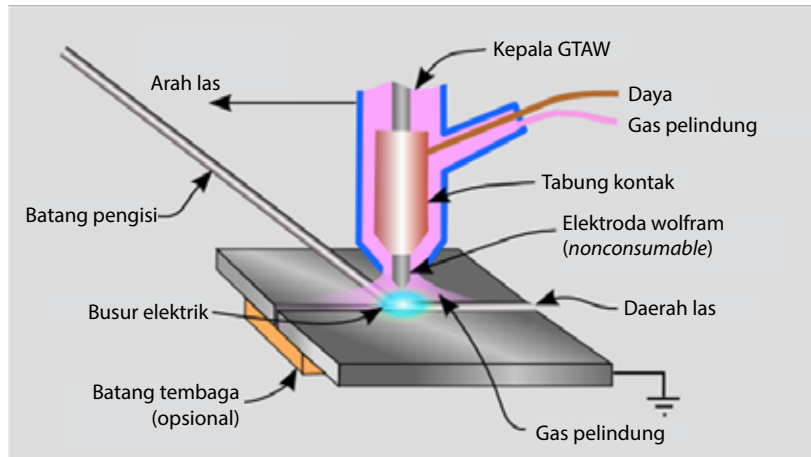
Beberapa keunggulan dari pengelasan busur listrik adalah (1) cara paling efisien untuk menggabungkan logam, (2) murah, (3) tidak menambah berat struktur secara signifikan karena penggunaan material yang efektif, (4) desain pengelasan dapat dilakukan dengan fleksibel. Sementara itu, beberapa keterbatasannya adalah (1) dilakukan secara manual sehingga harus dilakukan oleh pengelas profesional yang biayanya mahal, (2) memerlukan energi listrik yang banyak sehingga berbahaya, (3) sulit untuk dilepas, dan (4) cacat sulit di deteksi pada sambungan.

Ada beberapa jenis pengelasan busur listrik, sebagai berikut.

1. Pengelasan busur listrik logam terlindungi (*shielded metal arc welding—SMAW*) adalah pengelasan busur listrik yang paling sederhana menggunakan elektroda berpelapis, seperti yang dijelaskan di atas.
2. Pengelasan busur listrik gas (*gas metal arc welding—GMAW*). Perbedaan utama GMAW dengan SMAW adalah jenis pelindung yang digunakan. Dalam GMAW, gas pelindung bukan



GAMBAR 6.41 Sirkuit pengelasan busur listrik.



GAMBAR 6.42 Ilustrasi gas tungsten arc welding (GTAW).

berasal dari pembakaran fluks pelapis elektroda, tetapi memang gas *inert* yang sengaja dialirkan melalui pemegang elektroda. Teknik ini sering juga disebut dengan MIG (*metal inert gas*).

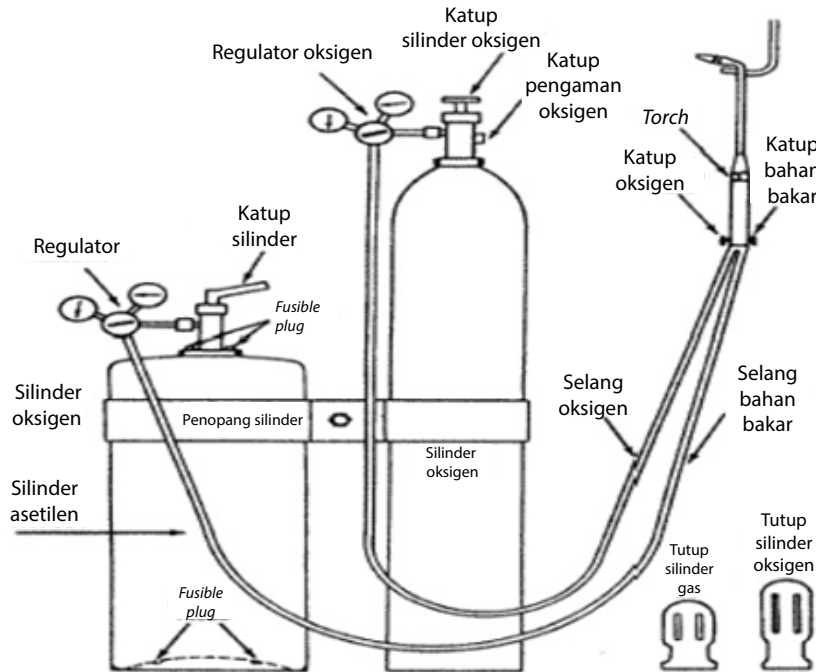
3. *Gas tungsten arc welding* (GTAW), atau sering disebut TIG (*tungsten inert gas*). Pada teknik ini, logam pengisi terpisah dari elektroda. Elektroda yang digunakan untuk menghasilkan busur listrik adalah tungsten, yang merupakan elektroda tidak terkonsumsi. Melalui pemegang elektroda, gas pelindung inert dialirkan. Secara skematis, teknik ini diilustrasikan pada Gambar 6.42.

Pengelasan Gas

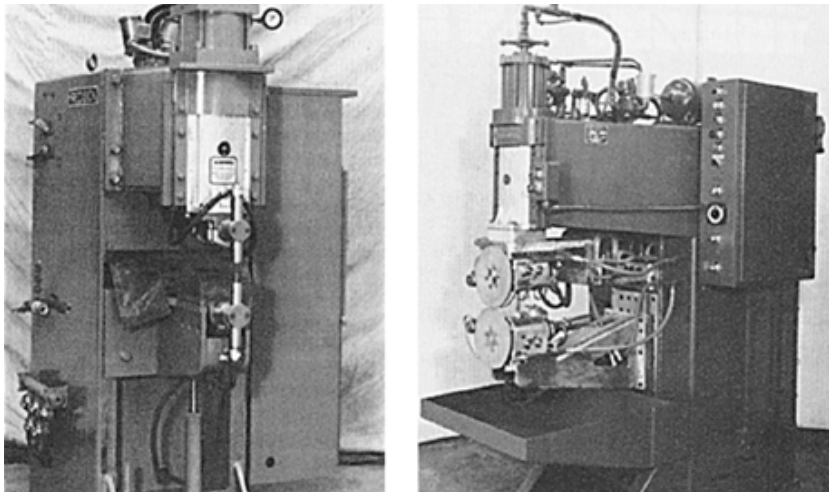
Pengelasan gas (*gas welding*) menggunakan nyala gas sebagai sumber panas. Ada beberapa jenis pengelasan gas, bergantung pada jenis gas yang digunakan, misalnya pengelasan gas oksi-asetilen, pengelasan udara-asetilen, pengelasan gas oksi-hidrogen. Pengelasan jenis ini yang banyak digunakan pada bengkel-bengkel las sederhana. Pada pengelasan ini, gas dibakar sehingga menghasilkan nyala yang dapat mencapai temperatur 3.300°C . Temperatur ini akan melelehkan logam pengisi dan logam dasar. Oksigen dari udara dan dari nyala api akan bereaksi dengan logam yang sedang meleleh membentuk oksida sehingga dapat menyebabkan cacat pengelasan. Biasanya, fluks ditambahkan pada kampuh untuk menghilangkan oksida. Fluks terbuat dari campuran natrium, kalium, litium, dan boraks, serta tersedia dalam bentuk serbuk atau pasta. Hasil las yang baik dapat diperoleh dengan memakai besar nyala yang sesuai, logam pengisi yang sesuai, dan pergeseran nyala yang mulus. Secara skematis, pengelasan gas ditampilkan pada Gambar 6.43.

Pengelasan Tahanan

Pengelasan tahanan (*resistance welding*) merupakan proses pengelasan di mana daerah sambungan logam dipanaskan hingga temperatur lebur (*fusi*) dengan cara memberikan tahanan pada aliran listrik. Hal ini dilakukan dengan menjepit dua atau lebih lembaran logam di antara dua buah elektroda tembaga



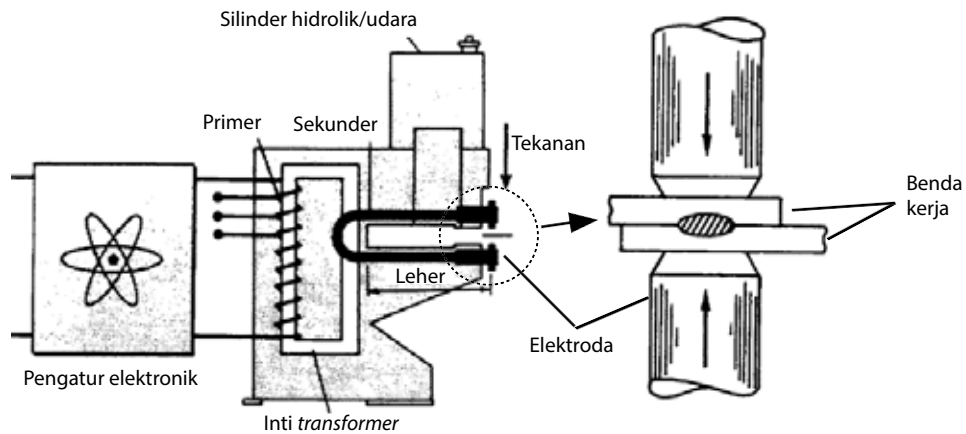
GAMBAR 6.43 Ilustrasi pengelasan gas.



GAMBAR 6.44 Alat pengelasan (a) titik dan (b) seam (kontinu).

Sumber: Diadaptasi dari Cary, H.B., *Modern Welding Technology*, Edisi ke-5 (Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall: 2002).

dan melewati aliran listrik ke dalamnya. Ketika temperatur logam mencapai temperatur leburnya, kedua lembaran ditekan (bisa secara manual, bisa secara otomatis) sehingga kedua lembaran logam akan saling menyambung. Pengelasan titik (*spot welding*) dan pengelasan kontinu (*seam welding*) adalah dua jenis pengelasan tahanan yang paling banyak digunakan (Gambar 6.44).



GAMBAR 6.45 Skema pengelasan titik.

Sumber: Diadaptasi dari Lindberg, R.A., *Processes and Materials of Manufacture*, Edisi ke-4 (Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall: 1990).

Pengelasan Titik

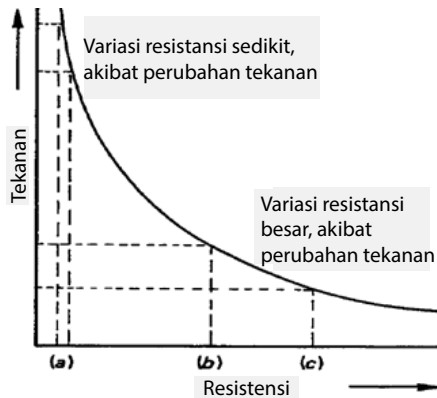
Material yang akan disambung diletakkan di antara dua elektroda dan diberikan tekanan (lihat Gambar 6.45). Kemudian, listrik dialirkan dari salah satu elektroda melewati material menuju elektroda yang lain. Dengan demikian, panas terpusat pada titik ujung elektroda dan sambungan terbentuk pada titik tersebut. Pengelasan titik (*spot welding*) banyak digunakan pada penyambungan lembaran logam. Pada pengelasan titik, tekanan dari kedua elektroda memengaruhi resistansi/tahanan yang dihasilkan (lihat Gambar 6.46). Tahanan ini akan memengaruhi kedalaman daerah fusi/penetrasi pada kedua pelat yang dilas.

Pengelasan Kontinu

Pengelasan kontinu (*seam welding*) mirip dengan pengelasan titik, kecuali bahwa titik-titik sambungan saling menumpuk satu sama lain sehingga membentuk sambungan yang kontinu. Pada proses ini, lembaran logam diletakkan di antara dua buah elektroda berbentuk lingkaran. Saat roda elektroda berputar, arus secara otomatis dinyalakan dan dimatikan pada kecepatan di mana dua material telah menyatu. Skema pengelasan kontinu dapat dilihat pada Gambar 6.47

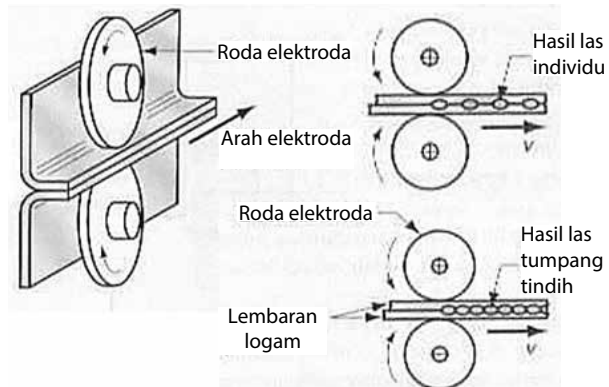
Pengelasan Padat

Pengelasan padat (*solid state welding*) merupakan jenis pengelasan dengan pemberian tekanan saja atau pemberian tekanan dengan menggunakan panas tanpa menggunakan tambahan material pengisi (*filler*). Proses pengelasan ini tidak terjadi pencairan benda kerja, dua buah material ditekan sehingga terjadi gaya kohesif antar-atom material dan pengikatan material terjadi secara mekanik. Pengelasan padat dibagi menjadi beberapa macam: (1) pengelasan dingin, (2) pengelasan friksi, (3) pengelasan eksplosif, (4) pengelasan canai (*roll*), (5) pengelasan ultrasonik, (6) pengelasan friksi-stir (*stir-friction welding*).



GAMBAR 6.46 Pengaruh tekanan dari elektroda terhadap resistansi proses pengelasan.

Sumber: Diadaptasi dari Lindberg, R.A., *Processes and Materials of Manufacture*, Edisi ke-4 (Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall: 1990).



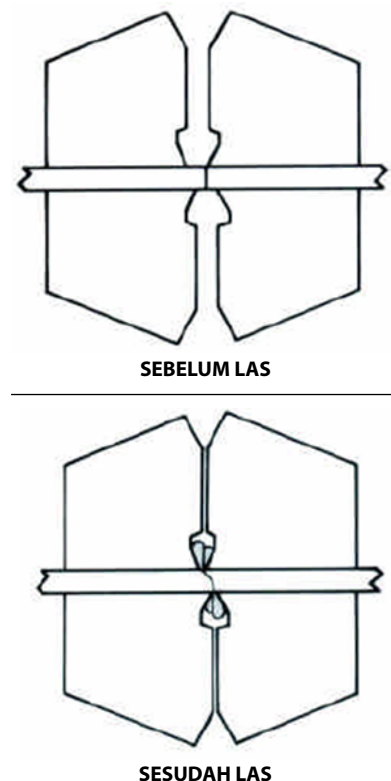
GAMBAR 6.47 Skema pengelasan kontinu.

Sumber: Diadaptasi dari American Welding Society, *Welding Handbook*, Edisi ke-9 Vol. 2 (Miami, Florida: American Welding Society, 2001).

Pengelasan Dingin

Pengelasan ini merupakan pengelasan padat dengan penyambungan dilakukan pada temperatur ruang. Proses pengelasan ini tanpa menggunakan panas, material yang disambung harus memiliki keuletan yang baik tanpa terjadi pengerasan pengerjaan. Pada umumnya, bentuk pengelasan ini adalah *butt* dan *lap*. Permukaan material yang akan disambung harus bersih dari kotoran dan minyak.

Proses pengelasan dingin dilakukan pada dua buah material yang telah dijepit dengan posisi saling berhadapan. Selanjutnya, tekanan diberikan ke material sehingga terjadi penyambungan. Bagian hasil sambungan yang keluar kemudian dibubut (*lihat Gambar 6.48*). Aplikasi pengelasan dingin pada umumnya untuk komponen listrik dan industri manufaktur (*lihat Gambar 6.49*)



GAMBAR 6.48 Prinsip pengelasan dingin.

Sumber: Diadaptasi dari American Welding Society, *Welding Handbook*, Edisi ke-9 Vol. 2 (Miami, Florida: American Welding Society, 2001).

Pengelasan Friksi

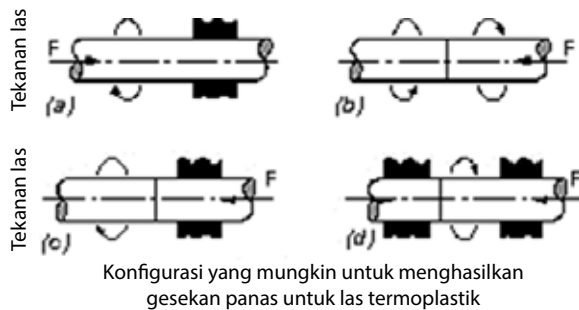
Pengelasan ini merupakan pengelasan padat dengan memberikan friksi/gaya gesek pada material sehingga material tersambung. Panas dapat dihasilkan akibat gaya gesek dari kedua material. Permukaan material yang akan disambung harus bersih dari kotoran dan minyak. Proses pengelasan ini dikenal juga dengan pengelasan putar, salah satu material diputar pada kecepatan tinggi, sedangkan material yang akan disambung ditekan terhadap material yang sedang diputar.



GAMBAR 6.49 Aplikasi pengelasan dingin pada kabel.

Sumber: Diadaptasi dari Wire World Internet, "Cold Welding Process by PWM", <http://www.wireworld.com/article/the-cold-welding-process-by-pwm.html>.

Gaya gesek dari kedua material menghasilkan panas, namun tidak terjadi pelelehan, kemudian material saling ditekan dan tersambung (lihat Gambar 6.50). Aplikasi pengelasan ini pada produk otomotif, sambungan kabel, alat potong, dan lain-lain (lihat Gambar 6.51).



Konfigurasi yang mungkin untuk menghasilkan gesekan panas untuk las termoplastik

GAMBAR 6.50 Prinsip pengelasan friksi.

Sumber: Diadaptasi dari <http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Letvektdesign/joining%20methods/joining-welding-friction%20welding.htm>.



GAMBAR 6.51 Aplikasi pengelasan friksi.

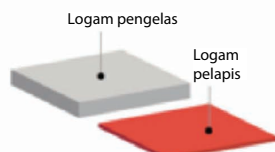
Sumber: Diadaptasi dari Spinweld, Inc., "Friction-Welding", <https://www.spinweld.com/friction-welding/>.

Pengelasan Eksplosif

Pengelasan eksplosif merupakan pengelasan padat dengan menggunakan ledakan untuk menyambung dua buah material. Pada umumnya, material yang disambung dengan menggunakan pengelasan ini berbentuk pelat besar dan panjang. Ledakan yang digunakan menghasilkan impak yang besar sehingga dapat menyambung dua material.

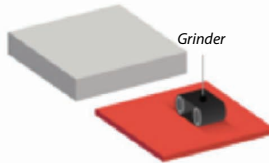
Pengelasan ini dilakukan dengan menumpuk tiga buah material yang terdiri atas material dasar, material yang akan disambung, dan detonator di bagian paling atas. Saat detonator diledakkan, material yang akan disambung menumbuk material dasar sehingga terjadi deformasi plastis dan dua pelat tersambung (Gambar 6.52). Aplikasi pengelasan ini bisa untuk produk tabung dan pelat berukuran besar (lihat Gambar 6.53).

1. Inspeksi material awal

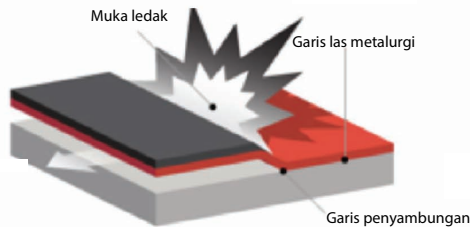
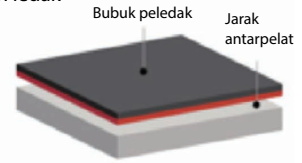


4. Peledakan

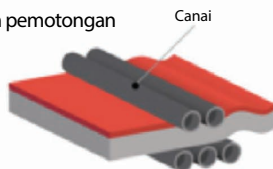
2. Amplas permukaan



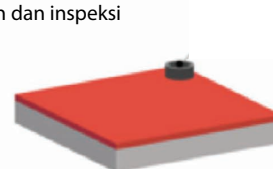
3. Mengatur penahan, pelapis, dan bahan ledak



5. Perataan dan pemotongan



6. Pengujian dan inspeksi



GAMBAR 6.52 Prinsip pengelasan eksplosif.

Sumber: Diadaptasi dari Nobelclad, "Explosion Welding Process", <http://www.nobelclad.com/process#how-it-works>.

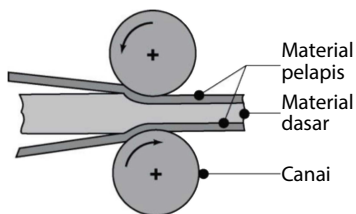


GAMBAR 6.53 Aplikasi pengelasan eksplosif.

Sumber: Diadaptasi dari Triton Alloys Inc., "Clad Steel", <https://www.tritonalloysinc.com/clad-steel/>.

Pengelasan Canai

Pengelasan canai (*roll*) memiliki prinsip yang sama dengan canai dingin/canai panas. Pengelasan ini menggunakan mesin canai untuk menggabungkan dua buah material berbentuk pelat. Dua buah pelat material ditumpuk dengan material penyambung di bagian atas dan bawah material dasar. Kemudian, material dimasukkan ke dalam mesin canai, tekanan, dan gaya gesek dari mesin canai menyebabkan terjadinya sambungan pada dua material (*lihat Gambar 6.54*).

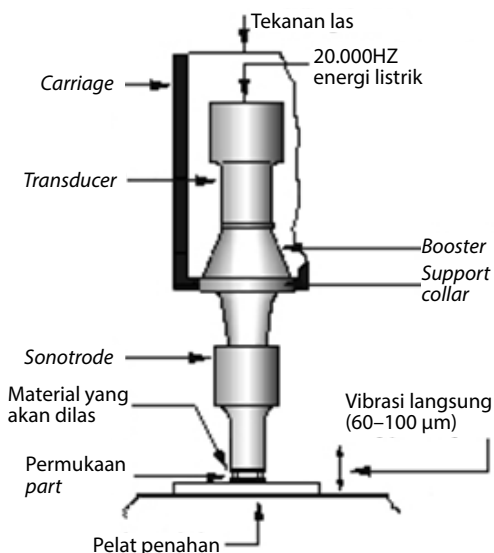


GAMBAR 6.54 Prinsip pengelasan canai.

Sumber: Diadaptasi dari http://www.weldmc.com/welding-rotator/?gclid=Cj0KEQiAl4TGBRDhgvmikdHPsdABEiQAtBcc8IM13P5ZwgWnNQ_Ny_GfgeU3OJov2aUYQx114bPm5MqwaAlk18P8HAQ.

Pengelasan Ultrasonik

Pengelasan ultrasonik merupakan pengelasan padat dengan menggunakan energi vibrasi berfrekuensi tinggi dan tekanan pada benda kerja sehingga terjadi sambungan. Penyambungan material tanpa terjadi peleburan logam dasar. Vibrasi berfrekuensi tinggi/ultrasonik dihasilkan dari transduser yang ditransmisikan ke ujung sonotrode sehingga kedua logam yang disambung akan timbul panas dan terjadi proses penyambungan akibat tekanan dari clamping (lihat Gambar 6.55). Aplikasi pengelasan ini untuk kumparan kabel, silinder, dan motor listrik (lihat Gambar 6.56).



GAMBAR 6.55 Prinsip pengelasan ultrasonik.

Sumber: Diadaptasi dari Crafttech Corporation, "Ultrasonic Welding, Sonic Welding", <http://www.crafttechcorp.com/ultrasonic-welding>.

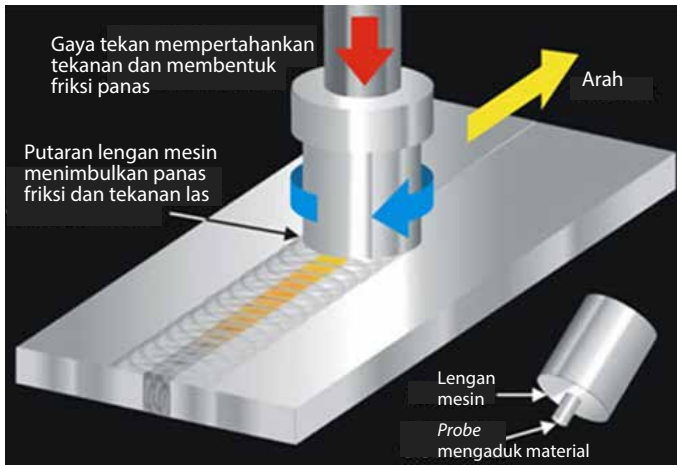


GAMBAR 6.56 Aplikasi pengelasan ultrasonik.

Sumber: Diadaptasi dari <http://www.redvue.co.uk/index.php/services/details/subcontract-ultrasonic-wire-splicing>.

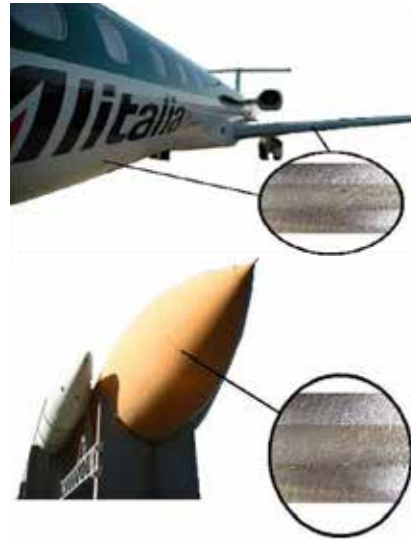
Pengelasan Friksi-Stir

Pengelasan friksi-stir (*stir-friction welding*) merupakan pengelasan padat di mana memanfaatkan gaya gesek pada mesin putar dan penekanan sehingga material dapat tersambung. Pada pengelasan ini, panas dihasilkan akibat gaya gesek dari mesin yang berputar di antara dua material, gaya gesek, dan perputaran dari mesin tersebut yang menyebabkan material melunak dan menyambung (lihat Gambar 6.57). Umumnya, material yang dilakukan pengelasan ini adalah aluminium karena keuletan yang tinggi. Aplikasi pengelasan ini pada industri penerbangan (lihat Gambar 6.58).



GAMBAR 6.57 Prinsip pengelasan friksi-stir.

Sumber: Diadaptasi dari <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/industrialisation-of-friction-stir-welding-for-aerospace-structures-december-2001/>.



GAMBAR 6.58 Aplikasi pengelasan friksi-stir.

Sumber: Diadaptasi dari Gatwick® Technologies Ltd, "Aerospace", <http://www.gatwicktechnologies.com/applications/aerospace>.

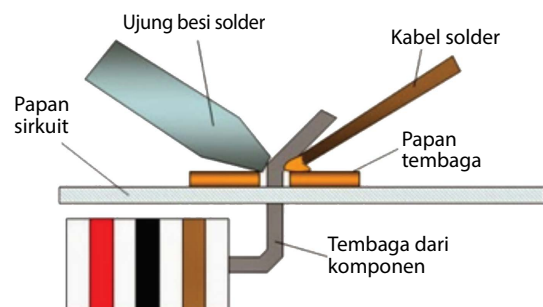
Soldering dan Brazing

Soldering dan *brazing* (patri) merupakan proses penyambungan dengan menggunakan cairan logam pengisi untuk membasahi permukaan material, baik menggunakan fluks maupun tanpa menggunakan fluks, sehingga terjadi ikatan antara logam pengisi dan dua material yang disambung. Perbedaan antara *soldering* dan *brazing* terletak pada temperatur logam pengisi, di mana *soldering* menggunakan logam pengisi dengan temperatur lebur di bawah 450°C dan *brazing* di bawah 450°C .

Prinsip penyambungan *soldering* dan *brazing* didasarkan pada mekanisme aliran kapilaritas dan pembasahan (*wetting*). Material yang akan disambung harus diberi *gap* agar logam pengisi dapat masuk mengalir ke dalam material. Fluks kemudian diberikan untuk membersihkan material dari oksida pengotor. Material pengisi dicairkan pada daerah sambungan sehingga mengisi celah antarsambungan dan membeku (lihat Gambar 6.59).

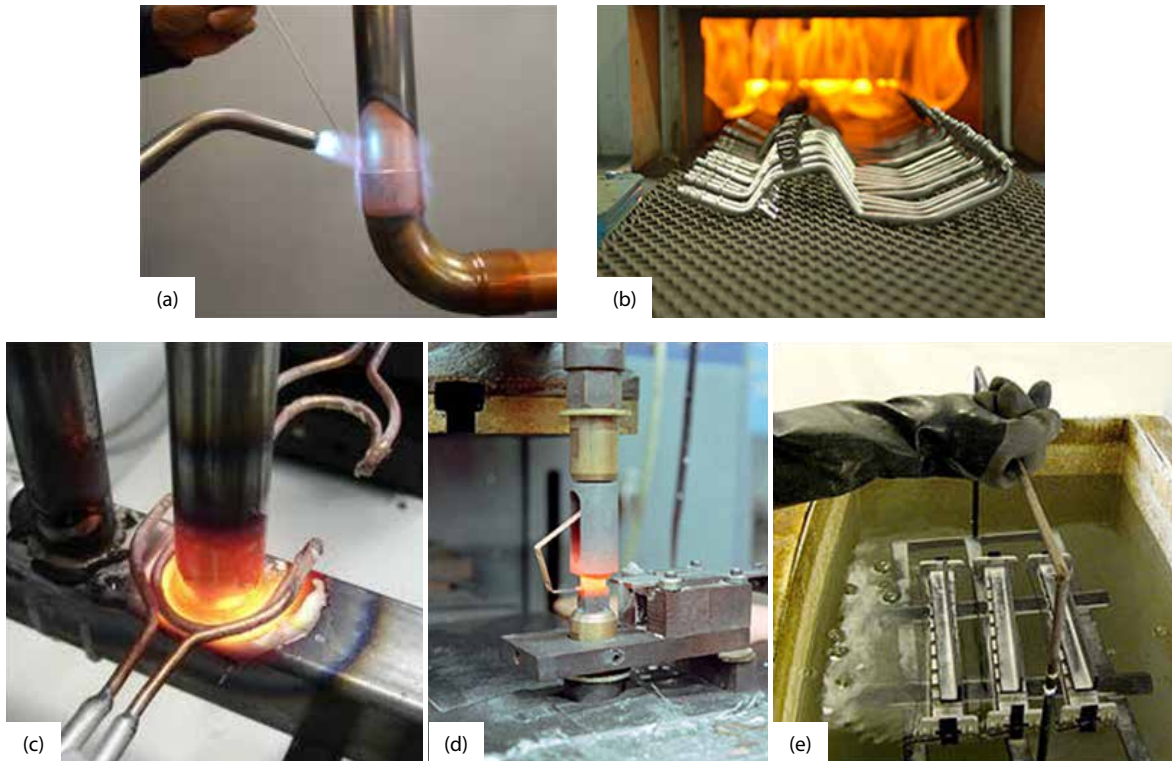
Selain temperatur lebur dan logam pengisi yang berbeda pada proses *soldering* dan *brazing*, terdapat beberapa perbedaan lain, sebagai berikut.

1. Proses *soldering* bereaksi membentuk fasa intermetalik, sedangkan *brazing* membentuk larutan padat.
2. Temperatur proses *soldering* lebih rendah daripada *brazing*.
3. *Soldering* yang bersifat komersial umumnya memiliki komposisi eutektik, sedangkan *brazing* berada pada rentang komposisi yang lebar.



GAMBAR 6.59 Prinsip solder dan *brazing*.

Sumber: Diadaptasi dari ME Mechanical, "Soldering, Brazing: Joining Process", <https://me-mechanicalengineering.com/soldering-brazing-joining-process/>.



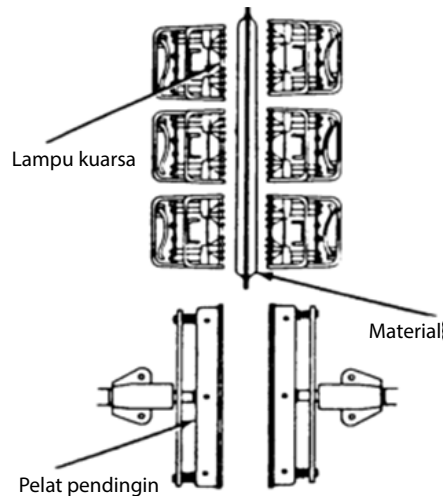
GAMBAR 6.60 Macam-macam proses *brazing* dan *soldering*.

- (a) *Torch brazing/soldering* (Sumber: Diadaptasi dari Harris Products Group, "Turn Up the Brazing Heat", <http://www.harrisproductsgroup.com/en/Expert-Advice/Articles/turn-up-the-brazing-heat.aspx>).
- (b) *Furnace brazing/soldering* (Sumber: Diadaptasi dari Kepston Ltd, "Furnace Brazing", http://www.kepston.co.uk/furnace_brazing.asp).
- (c) *Induction brazing/soldering* (Sumber: Diadaptasi dari <http://satrainternational.tradeindia.com/induction-brazing-equipment-1477840.html>).
- (d) *Resistance brazing/soldering* (Sumber: Diadaptasi dari Contact Technologies, Inc., "Products: Electrical Contact Assemblies", <http://www.contacttechnologies.com/Electrical-Contact-Assemblies.htm>).
- (e) *Dip brazing/soldering* (Sumber: Diadaptasi dari Coleman Microwave Company, "How Brazing Works", http://www.aluminumdipbrazing.com/how_brazing.html).

Proses *soldering* dan *brazing* terdiri atas beberapa macam, sebagai berikut.

1. *Torch brazing/soldering*. Proses ini menggunakan sumber panas berasal dari pembakaran campuran gas asetilen dengan oksigen [lihat Gambar 6.60(a)].
2. *Furnace brazing/soldering*. Proses ini menggunakan dapur pemanas [lihat Gambar 6.60(b)].
3. *Induction brazing/soldering*. Proses ini menggunakan sumber panas dari induksi arus listrik ke material yang akan disambung [lihat Gambar 6.60(c)].
4. *Resistance brazing/soldering*. Proses ini menggunakan sumber panas yang diperoleh dari resistansi listrik [lihat Gambar 6.60(d)].

5. *Dip brazing/soldering*. Proses ini menggunakan mekanisme pencelupan benda kerja ke dalam bak berisi cairan logam pengisi [lihat Gambar 6.60(e)].
6. *Infrared brazing/soldering*. Proses ini menggunakan sumber panas berasal dari radiasi sinar inframerah (lihat Gambar 6.61).

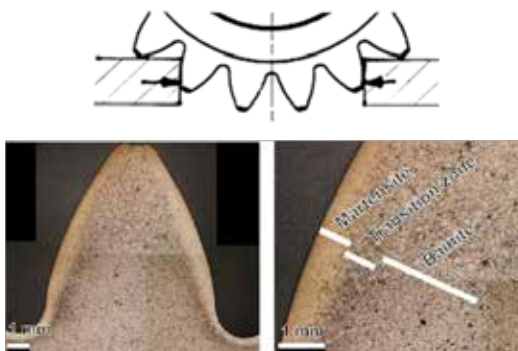


GAMBAR 6.61 Proses *infrared brazing/soldering*.

Sumber: Diadaptasi dari <http://stickweld.com/information/tc-9-237-welding-theory-and-application/tc-9-237-chapter-6-section-i/>.

Latihan

1. Roda gigi dapat dibuat dengan proses pengecoran presisi atau metalurgi serbuk. Jelaskan kapankah waktu yang tepat untuk memilih pengecoran presisi dan kapankah memilih proses metalurgi serbuk?
2. Roda gigi yang dikarburisasi memiliki kekerasan permukaan yang jauh lebih tinggi dari kekerasan di bagian dalam. Mengapa?Jelaskan.



Sumber: Diadaptasi dari Sven Bengtsson, Linnéa Fordén, dan Magnus Bergström, "High Performance Gears", https://www.researchgate.net/publication/265536112_HIGH_PERFORMANCE_GEARS.

3. Cerek aluminium terdiri dari empat bagian, yaitu badan cerek, tutup cerek, pegangan cerek, dan moncong cerek. Jelaskan proses manufaktur dari setiap bagian cerek tersebut.



4. Jelaskan proses manufaktur sepasang engsel yang terbuat dari baja.



5. Jelaskan proses manufaktur dan perlakuan panas dari baut ini. Kemudian, jelaskan metode las yang digunakan untuk mengelas lambung kapal yang terbuat dari pelat baja setebal 10 mm.



MEKANISME PENGUATAN PADA LOGAM

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

1. Menjelaskan berbagai mekanisme penguatan pada logam.
2. Menjelaskan teknik untuk melakukan penguatan logam.
3. Menjelaskan hubungan antara perubahan struktur dan perubahan sifat mekanis logam setelah pemrosesan.

7.1 Pendahuluan

Sebagian besar logam dapat ditingkatkan kekuatan dan kekerasannya melalui beberapa teknik. Tujuan utama proses penguatan adalah menghasilkan logam dengan kekuatan dan kekerasan optimum, serta keuletan yang cukup baik. Prinsip dasar penguatan pada logam adalah dengan menghambat pergerakan dislokasi melalui berbagai teknik. Ketika dislokasi terhambat pergerakannya, maka logam akan menjadi lebih kuat dan keras. Berikut adalah beberapa teknik penguatan yang akan dibahas dalam buku ini

1. Pengerasan regang (*strain hardening*).
2. Penguatan batas butir (*grain boundary strengthening*).
3. Penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*).
4. Penguatan pengendapan (*precipitation strengthening*).

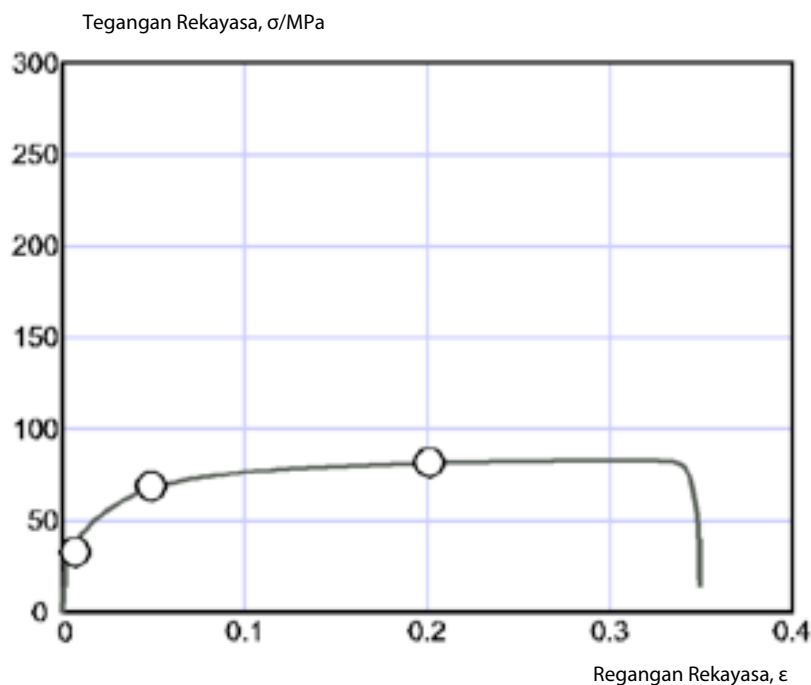
7.2 Pengerasan Regang

Pengerasan regang adalah suatu fenomena di mana material menjadi kurang ulet, lebih keras, dan lebih kuat setelah mengalami deformasi plastis pada temperatur ruang. Semakin besar perubahan bentuk yang dialami material tersebut, semakin besar peningkatan kekerasan yang terjadi. Persentase perubahan bentuk material dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\%CW = \frac{(A_0 - A_d)}{A_0} \times 100\% \quad (7.1)$$

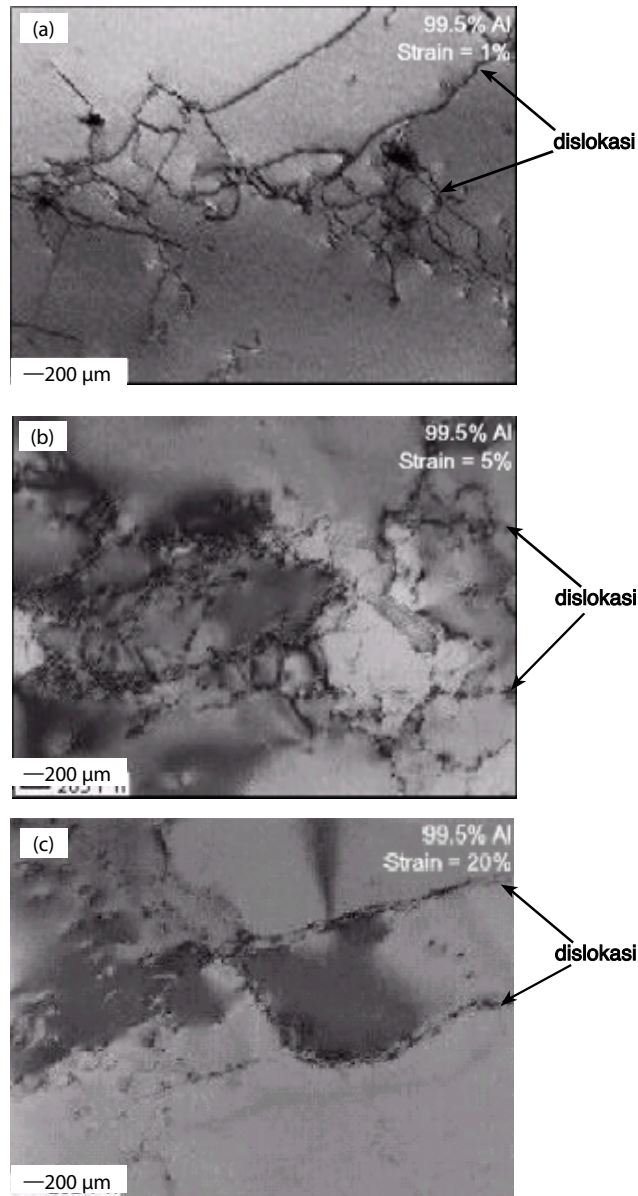
di mana %CW = persentase perubahan bentuk; A_0 = luas penampang awal; A_d = luas penampang setelah dideformasi.

Fenomena pengerasan regang dapat diilustrasikan dari hasil uji tarik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.1, yaitu pada aluminium murni 1050. Struktur mikro dari aluminium murni tersebut terdapat pada tiga posisi: regangan 1%, regangan 5%, dan regangan 20% selama uji tarik (lihat Gambar 7.2). Gambar 7.2 menunjukkan bahwa derajat deformasi meningkat dari 0% hingga 20% menyebabkan terjadinya peningkatan kerapatan dislokasi. Peningkatan kerapatan dislokasi menyebabkan dislokasi semakin sulit untuk bergerak. Hal ini dapat dianalogikan dengan laju kendaraan di jalan raya, di mana dislokasi adalah kendaraan dan jalan raya adalah materialnya. Apabila jalan raya kosong, maka kendaraan akan mudah untuk bergerak. Namun demikian, jika kendaraan sangat banyak, jalan menjadi macet dan kendaraan akan bergerak sangat lambat.



GAMBAR 7.1 Diagram tegangan-regangan aluminium murni 1050 hasil pengujian tarik.

Sumber: Diadaptasi dari <http://aluminium.matter.org.uk/>.



GAMBAR 7.2 Foto TEM dari aluminium 1050 pada kondisi regangan: (a) 0%, (b) 5%, dan (c) 20%. Terlihat adanya peningkatan kerapatan dislokasi dengan peningkatan regangan.

Sumber: Diadaptasi dari <http://aluminium.matter.org.uk/>.

Deformasi pada hakekatnya adalah proses menggerakkan dislokasi, yang juga dapat menyebabkan terbentuknya dislokasi baru melalui mekanisme penguncian dan *looping* dislokasi. Kekuatan logam berbanding lurus dengan kerapatan dislokasi sesuai persamaan berikut.

$$\tau = \tau_0 + \alpha G b \rho^{\frac{1}{2}} \quad (7.2)$$

di mana G = modulus geser; b = vektor burger; τ = kekuatan geser; τ_0 = kekuatan geser awal; α = konstanta; ρ = kerapatan dislokasi.

Seusai dengan Persamaan (7.2), peningkatan kerapatan dislokasi karena deformasi plastis (Gambar 7.2) mengakibatkan peningkatan kekuatan material, atau disebut bahwa deformasi plastis yang diberikan pada logam telah membuat logam tersebut mengalami pengerasan regangan. Mekanisme penghambatan dislokasi oleh dislokasi lainnya telah membuat logam menjadi lebih keras dari keadaan awalnya. Kristal yang telah mengalami deformasi plastis mempunyai lebih banyak energi daripada kristal yang tidak memiliki regangan. Sejumlah energi yang diberikan melalui mekanisme deformasi, seperti (energi) tarik, tekan, dan geser disimpan oleh logam tersebut sebagai energi regangan. Lebih jauh lagi, sifat-sifat lain yang dimiliki logam, seperti konduktivitas listrik dan ketahanan korosi, juga dapat dimodifikasi melalui deformasi plastis.

Sifat-sifat yang dibentuk oleh deformasi plastis tidak permanen. Artinya, sifat ini dapat kembali ke kondisi semula jika ada kesempatan, di mana atom-atom akan bergerak dan membentuk susunan yang lebih stabil, tanpa regangan. Kesempatan untuk kembali ke kondisi semula tercipta jika logam memperoleh energi dari luar berupa energi kalor melalui perlakuan panas. Proses perlakuan panas untuk mengembalikan keuletan logam disebut proses anil, di mana logam dipanaskan pada temperatur tertentu dan kemudian didinginkan secara lambat (perlahan-lahan). Mekanisme yang terjadi selama proses pemanasan terdiri dari tiga tahap, yaitu pemulihan, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir (lihat Gambar 7.3).

Pemulihan

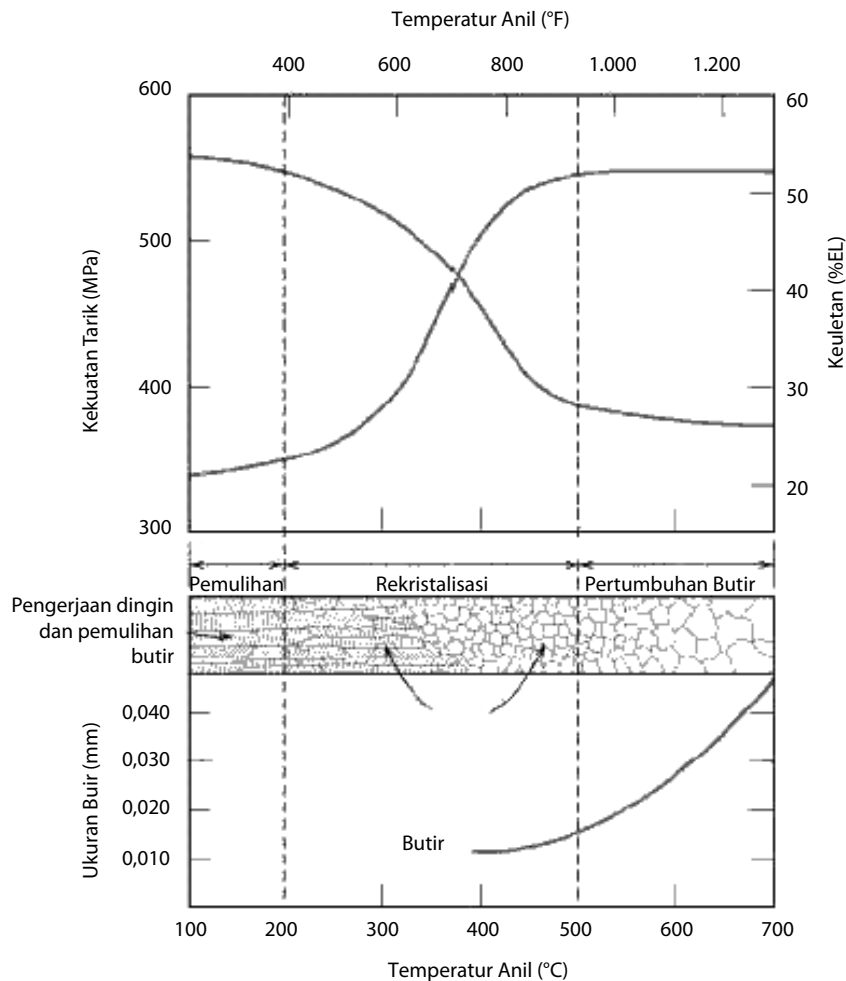
Selama pemulihan, sebagian energi regangan yang disimpan logam dilepaskan akibat dari peningkatan difusi atom pada temperatur yang dinaikkan. Oleh karena energi tersebut, dislokasi yang semula saling menghambat satu sama lain, mulai bergerak membentuk susunan yang stabil hingga terjadi pengurangan jumlah dislokasi pada logam tersebut. Susunan dislokasi yang baru terbentuk pada tahap ini memiliki energi regang yang kecil. Perlu diperhatikan bahwa proses pemulihan yang dilakukan tidak mengubah struktur butir logam. Struktur butir logam masih sama seperti setelah dilakukan deformasi plastis (Gambar 7.3). Perubahan yang terjadi pada tahap ini hanyalah susunan dislokasi yang ada pada butir-butir. Sifat-sifat fisik, seperti konduktivitas fisik dan panas, kembali ke kondisi awal sebelum dilakukan pengerjaan dingin. Temperatur pemulihan pada logam umumnya berbeda-beda, tetapi biasanya **temperatur pemulihan** sekitar 0,4 kali titik lebur.

Rekristalisasi

Setelah proses pemulihan selesai, butir masih memiliki energi regangan yang relatif besar. Getaran termal kisi yang lebih besar pada temperatur tinggi memungkinkan terjadinya pengaturan kembali atom-atom dan membentuk butiran yang lebih sempurna. Rekristalisasi pada hakikatnya merupakan proses pembentukan sejumlah butir baru yang rata sisi, bebas energi

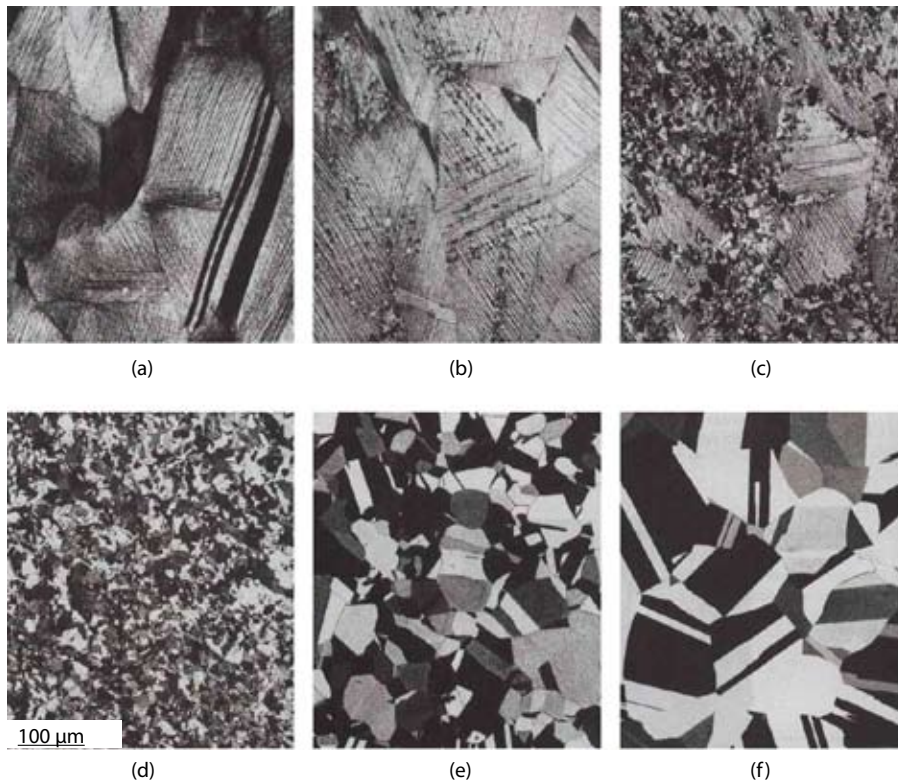
regangan, dan kepadatan dislokasinya cukup rendah. Kondisi tersebut memiliki karakteristik seperti ketika deformasi plastis belum dilakukan. Energi aktivasi untuk menghasilkan struktur butir yang baru adalah selisih antara energi internal logam dalam kondisi teregang dan energi internal logam dalam kondisi tak teregang. Butir yang baru membentuk inti kecil, kemudian, tumbuh membesar hingga menggantikan struktur sebelumnya. Proses tersebut melibatkan difusi dalam jangkauan yang pendek.

Selama proses rekristalisasi berlangsung, sifat-sifat mekanis, seperti kekerasan dan kekuatan menurun, serta kembali seperti kondisi sebelum pengerjaan dingin. Akibatnya, logam menjadi lebih lunak, lemah, dan ulet. Proses rekristalisasi merupakan proses yang bergantung pada waktu dan temperatur. Besarnya rekristalisasi bergantung pada waktu, ilustrasi proses tersebut digambarkan pada Gambar 7.3. Perlakuan panas yang tepat dapat memodifikasi rekristalisasi sehingga diperoleh sifat mekanis yang diinginkan.



GAMBAR 7.3 Pengaruh perlakuan panas pada logam yang telah dilakukan pengerjaan dingin. Perlakuan panas tersebut menyebabkan pemulihan, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir.

Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction 8th Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 2010.



GAMBAR 7.4 Perubahan struktur mikro kuningan selama dilakukan pemanasan. (a) Struktur butir setelah pengerjaan dingin sebesar 33%. (b) Tahap awal rekristalisasi setelah pemanasan selama 3 detik pada temperatur 580°. Pada fase ini, butir yang kecil mulai tumbuh. (c) Tahap lanjut rekristalisasi setelah pemanasan selama 4 detik pada temperatur 580°C. Pada tahap ini, beberapa butir baru telah menggantikan butir lama. (d) Rekristalisasi yang penuh tercapai setelah pemanasan selama 8 detik pada temperatur 580°C. (e) Pertumbuhan butir setelah pemanasan selama 15 menit pada temperatur 580°C. (f) Pertumbuhan butir setelah pemanasan selama 10 menit pada temperatur 700°C.

Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, Materials Science And Engineering An Introduction 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

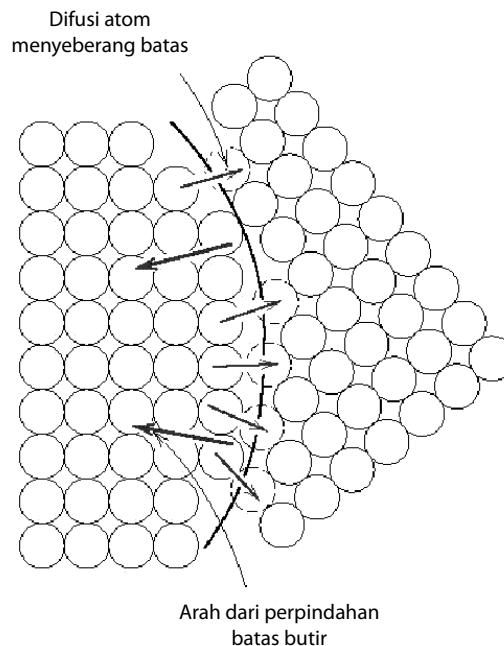
Pada proses rekristalisasi, atom-atom bergerak dan menata diri kembali. Penataan kembali ini lebih mudah pada temperatur tinggi. **Temperatur rekristalisasi** didefinisikan sebagai temperatur di mana butir baru mulai muncul pada butir yang lama. Pendekatan kasarnya, temperatur rekristalisasi berada di antara 0,3 dan 0,6 kali titik lebur logamnya. Temperatur rekristalisasi dipengaruhi oleh pengerjaan dingin yang diberikan pada logam. Semakin besar pengerjaan dingin yang diberikan pada logam, maka temperatur rekristalisasinya akan semakin menurun. Logam yang mengalami pengerasan regang lebih besar memiliki energi yang lebih besar daripada logam dengan pengerasan regang lebih kecil. Dengan energi yang telah ada, tidak banyak lagi yang diperlukan untuk energi termal tambahan untuk mengatur atom-atom dalam membentuk butiran yang baru, sehingga rekristalisasi dapat terjadi pada temperatur rendah. Selain tingkat deformasi plastis, rekristalisasi juga dipengaruhi oleh waktu. Pada temperatur yang lebih rendah, jika ditahan dalam waktu yang lama, rekristalisasi dapat terjadi.

Paduan logam juga berpengaruh penting terhadap proses rekristalisasi. Rekristalisasi pada logam yang murni akan lebih cepat daripada logam paduan karena paduan umumnya menaikkan temperatur rekristalisasi, terkadang sangat signifikan. Perubahan struktur mikro pada kuningan hasil pengerjaan dingin yang mengalami rekristalisasi ditunjukkan pada Gambar 7.4.

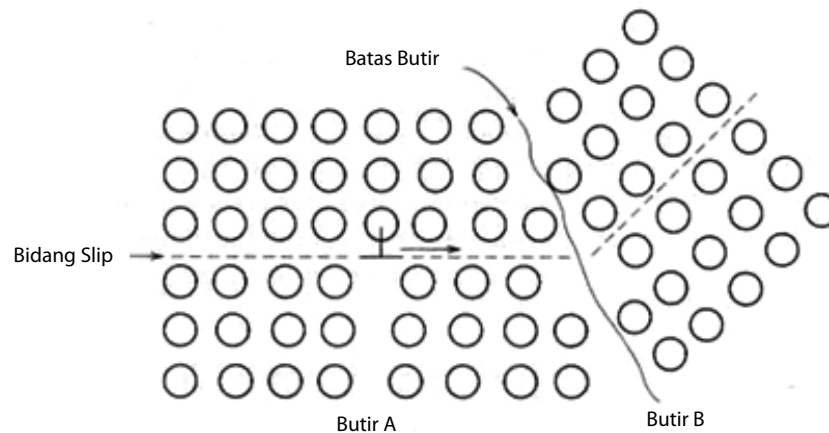
Pertumbuhan Butir

Apabila material yang telah mengalami rekristalisasi dianil lebih lanjut, maka pertumbuhan butir dapat terjadi. Butir-butir baru yang bebas tegangan, yang muncul pada saat rekristalisasi akan tumbuh membesar hingga menggantikan seluruh butir yang lama. Perlu diperhatikan bahwa pertumbuhan butir tidak harus terjadi pada logam yang sudah dilakukan pengerjaan dingin, pemulihan, dan rekristalisasi, tetapi (pertumbuhan butir) juga terjadi pada logam-logam yang bebas tegangan. Logam-logam yang tidak dideformasi plastis, jika dianil pada temperatur dan dalam waktu tertentu, juga akan mengalami pertumbuhan butir. Bahkan, keramik juga dapat mengalaminya.

Pertumbuhan butir terjadi melalui migrasi batas butir. Pada kenyataannya, tidak semua butir dapat tumbuh menjadi besar. Ada suatu mekanisme pengusuran butir yang kecil oleh butir yang lebih besar. Pergeseran batas butir pada mekanisme pengusuran pada dasarnya merupakan difusi atom dari butir yang satu ke butir yang lain. Atom-atom yang berada dekat dengan batas butir akan berdifusi ke seberang batas butir dan mengikuti arah kristal butir di sebelahnya, sehingga butir semakin membesar. Mekanisme tersebut dapat dilihat pada Gambar 7.5.



GAMBAR 7.5 Mekanisme pertumbuhan butir melalui difusi atom pada batas butir.



GAMBAR 7.6 Dislokasi bergerak dan bertemu dengan batas butir yang bertindak sebagai penghalang untuk terjadinya luncuran. Bidang luncuran tidak berlanjut dan berubah arah melintasi batas butir ke butir yang lain.

7.3 Penguatan Batas Butir (*Grain Boundary Strengthening*)

Ukuran butir atau diameter rata-rata butir dalam logam polikristal sangat memengaruhi sifat mekanik logam tersebut. Sulit atau tidaknya suatu logam ketika dideformasi dalam skala atomik sama dengan sulit atau tidaknya dislokasi untuk bergerak. Dislokasi meluncur pada bidang luncur akibat adanya tegangan geser yang bekerja pada material. Dislokasi akan terus bergerak hingga bertemu dengan penghalang, yaitu batas butir. Ketika bertemu dengan batas butir, maka mereka akan saling menumpuk sehingga menjadi tidak dapat bergerak. Mekanisme tersebut diilustrasikan secara skematis pada Gambar 7.6. Dislokasi yang sejenis sama akan saling tolak-menolak. Dengan demikian, apabila terdapat n buah dislokasi, maka peningkatan tegangan yang terjadi adalah $n \times \tau$, di mana τ adalah tegangan dari sebuah dislokasi. Jadi, material dengan ukuran butir kecil memiliki daerah antarbutir yang sangat besar sehingga memiliki kekuatan luluh yang besar pula. Hubungan antara ukuran butir dan kekuatan luluh material (σ_y) dinyatakan melalui persamaan Hall-Petch.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{\frac{1}{2}} \quad (7.3)$$

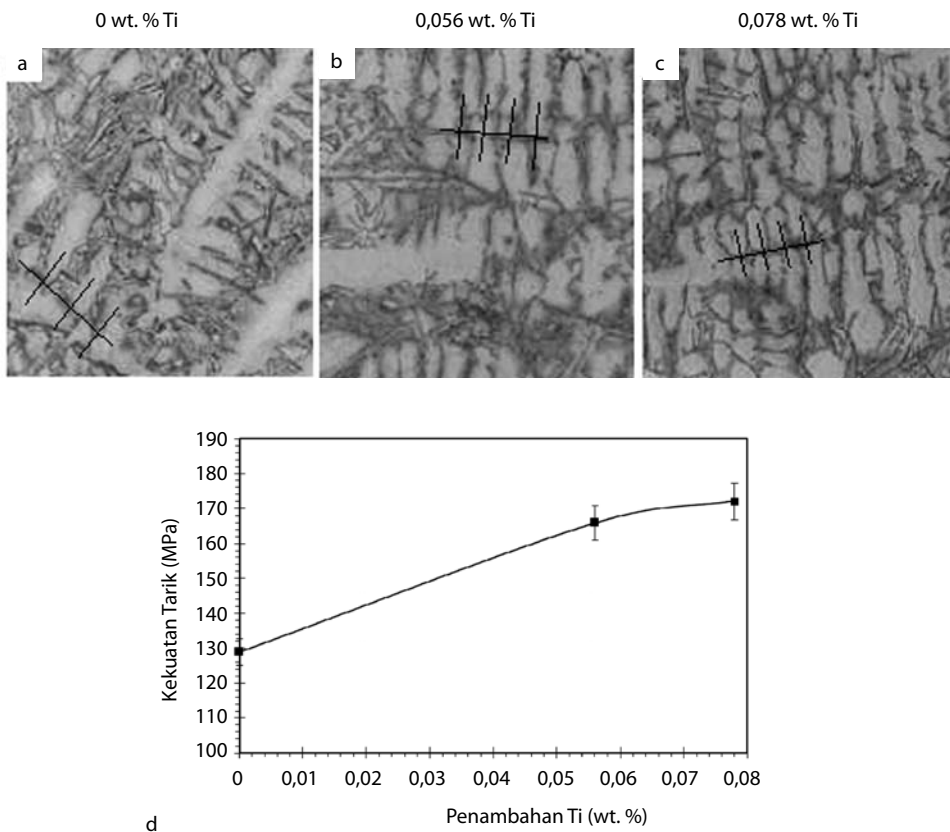
di mana d = diameter butir rata-rata; σ_0 = kekuatan luluh awal; dan k_y merupakan konstanta.

Metode penghalusan butir yang banyak dipakai adalah (1) penambahan unsur penghalus butir, seperti titanium dan karbon; dan (2) perlakuan termal-mekanik. Penambahan unsur penghalus butir dilakukan saat logam dalam kondisi cair, di mana bertujuan untuk merangsang pertumbuhan inti sehingga lebih banyak butir yang terbentuk per satuan volume, yang artinya butir menjadi halus. Penghalus butir dapat berbentuk batang paduan, seperti Al-Ti, Al-Ti-B, atau Al-Ti-C, maupun serbuk yang mengandung potassium fluorotitanate dan potassium fluoroborate (lihat Gambar 7.7).

Gambar 7.8 menunjukkan struktur mikro paduan Al-Si yang diberi penghalus butir Al-Ti berbentuk serbuk, di mana besar butir dan jarak lengan antardendrit menurun, yang diikuti oleh peningkatan kekerasan.



GAMBAR 7.7 Penghalus butir Al-Ti berbentuk (a) batang paduan dan (b) serbuk.

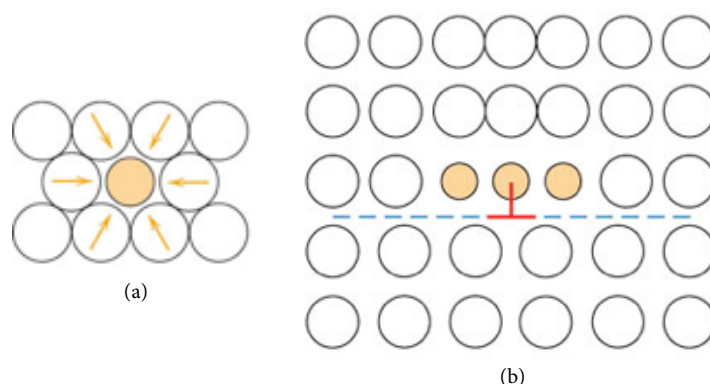


GAMBAR 7.8 Struktur mikro paduan Al-Si-Cu dengan penambahan (a) 0, (b) 0,056, dan (c) 0,078 wt. % Ti, yang menunjukkan penghalusan butir dan penurunan jarak lengan antardendrit, serta (d) pengaruhnya terhadap kekuatan tarik.

7.4 Penguatan Larutan Padat

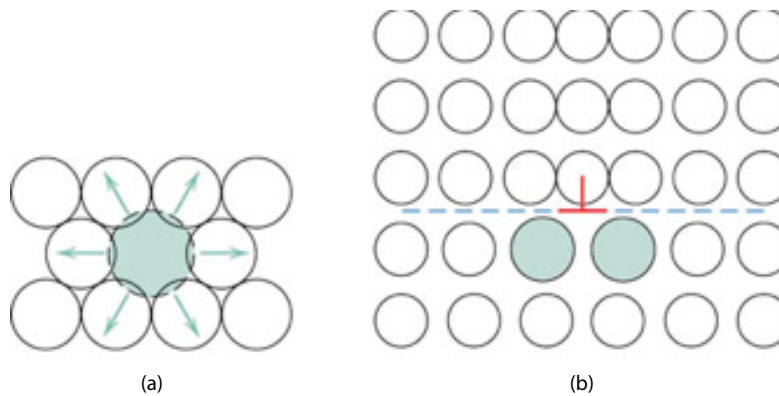
Teknik lain untuk memperkuat dan memperkeras logam adalah dengan menambah unsur paduan yang masuk ke posisi interstisi atau substitusi dari logam induk sehingga terbentuk larutan padat. Oleh karena itu, teknik ini disebut penguatan larutan padat. Unsur paduan tersebut menyebabkan adanya regangan pada kisi karena perbedaan ukuran atom. Atom yang kecil akan menyebabkan tegangan tarik pada kisi logam induk, sehingga sangat tepat untuk berasosiasi dengan dislokasi sisi pada bagian bawahnya. Hal ini menyebabkan adanya tegangan di sekitar dislokasi yang pada akhirnya akan meningkatkan kekerasan paduan (lihat Gambar 7.9). Sebaliknya, atom yang besar akan menyebabkan tegangan tekan pada kisi logam induk dan akan berasosiasi dengan dislokasi pada bagian atasnya (lihat Gambar 7.10). Logam murni selalu lebih lunak dari paduan logam. Semakin banyak unsur paduan yang ditambahkan, semakin keras sebuah paduan.

Contoh yang paling mudah dipahami adalah emas. Emas murni 24 karat bersifat sangat lunak sehingga mudah dibengkokkan. Emas 22 karat atau 18 karat lebih keras dan lebih sulit untuk dibengkokkan karena mengandung unsur tembaga yang memperkuat emas. Contoh lain adalah paduan aluminium AA319 yang sering dipakai sebagai bahan blok mesin sepeda motor, yang diperkuat dengan penambahan seng yang masuk dari aluminium bekas (lihat Gambar 7.11). Penambahan 1 wt. % Zn ke dalam paduan aluminium secara signifikan menaikkan kekuatan dan menurunkan keuletan. Peningkatan kekuatan semakin besar dengan semakin tingginya kadar Zn, yang diikuti dengan penurunan keuletan. Unsur Zn memperkuat aluminium, di mana Zn terlarut sebagai substitusi pada kisi atom aluminium. Perbedaan jari-jari atom aluminium dan seng (0,143 nm dan 0,133 nm) menyebabkan terjadinya regangan kisi dengan kehadiran Zn yang kemudian meningkatkan kekuatan. Peningkatan kegetasan akibat kehadiran Zn ini akan menyebabkan material menjadi mudah pecah.



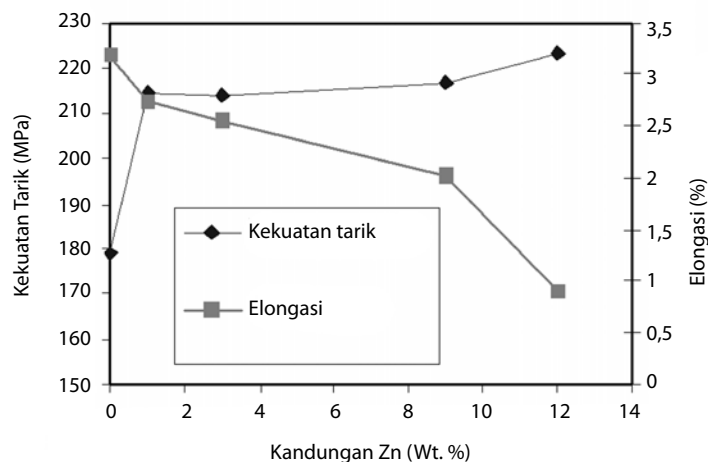
GAMBAR 7.9 (a) Tegangan tarik kisi akibat unsur paduan substitusi yang berukuran lebih kecil, dan (b) posisi unsur paduan berukuran kecil relatif terhadap dislokasi.

Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, Materials Science And Engineering An Introduction 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.



GAMBAR 7.10 (a) Tegangan tekan kisi akibat unsur paduan substitusi yang berukuran lebih besar, dan (b) posisi unsur paduan berukuran besar relatif terhadap dislokasi.

Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, Materials Science And Engineering An Introduction 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.



GAMBAR 7.11 Peningkatan kekuatan tarik dan penurunan keuletan akibat penguatan larutan padat dengan penambahan Zn pada paduan aluminium AA319.

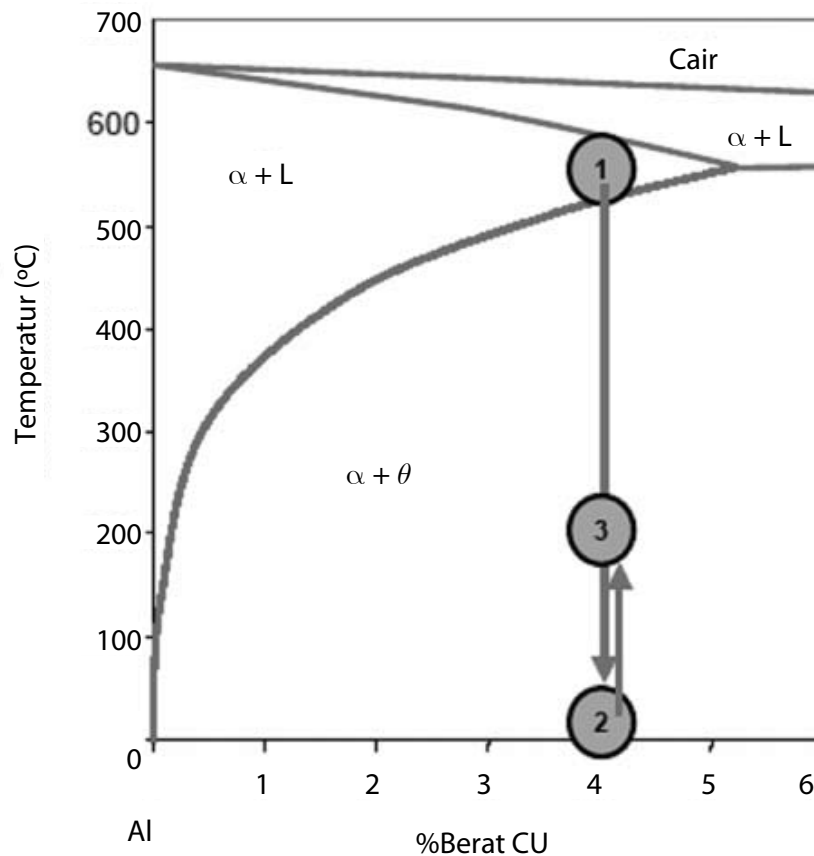
7.5 Penguatan Pengendapan

Kekuatan dan kekerasan dari beberapa logam dapat ditingkatkan dengan membentuk endapan fasa kedua yang terdistribusi di fasa matriks. Endapan fasa kedua ini terbentuk melalui transformasi fasa selama proses perlakuan panas, dan prosesnya disebut penguatan pengendapan. Terkadang, proses ini disebut "penuaan" karena endapan terbentuk seiring dengan bertambahnya waktu alias akibat penuaan. Contoh paduan yang dapat mengalami penguatan pengendapan adalah aluminium-tembaga, tembaga-berilium, tembaga-timah putih, dan beberapa logam fero, seperti baja tahan karat pengerasan pengendapan.

Persyaratan-persyaratan untuk logam agar dapat mengalami penguatan pengendapan adalah (1) memiliki kelarutan unsur paduan cukup besar pada temperatur tinggi, dan (2) kelarutan unsur paduan tersebut menurun drastis dengan menurunnya temperatur. Proses perlakuan panas untuk

penguatan pengendapan meliputi tiga tahap: (1) perlakuan pelarutan, (2) pencelupan, dan (3) penuaan. Temperatur masing-masing tahap diilustrasikan pada Gambar 7.12.

Perlakuan pelarutan adalah proses pemanasan pada daerah satu fasa (titik 1 pada Gambar 7.12), yang akan membuat paduan menjadi homogen karena seluruh unsur paduan larut ke dalam logam induk. Perlakuan pelarutan perlu dilakukan dalam beberapa waktu untuk memastikan seluruh unsur paduan terlarut sempurna. Proses ini diikuti pendinginan yang sangat cepat membuat paduan yang homogen tersebut menjadi larutan padat lewat jenuh (*supersaturated solid solution*), di mana atom-atom terlarut yang terperangkap terdapat di dalamnya karena tidak memiliki waktu untuk berdifusi selama proses pendinginan. Kemudian, proses pemanasan kembali (temperatur biasanya lebih rendah dari pemanasan sebelumnya; titik 3 pada Gambar 7.12) akan menyebabkan atom-atom yang terperangkap dalam larutan padat lewat jenuh tersebut berdifusi dan bereaksi dengan atom-atom lain sehingga membentuk endapan yang umumnya bersenyawa intermetalik. Berikut adalah penjelasan masing-masing tahapan tersebut.



GAMBAR 7.12 Tahapan proses penguatan pengendapan yang dilakukan pada paduan Al-4Cu, di mana (1) perlakuan pelarutan dilakukan pada suhu sekitar ~550°C lalu dilanjutkan dengan (2) proses pencelupan pada temperatur ruang. Selanjutnya, dilakukan (3) proses penuaan buatan pada temperatur yang lebih rendah dari temperatur perlakuan pelarutan.

Perlakuan Pelarutan

Tahapan proses pertama dalam penguatan pengendapan adalah proses perlakuan pelarutan, yaitu proses pemanasan pada temperatur tinggi dalam selang waktu tertentu untuk melarutkan fasa kedua yang terbentuk selama dan setelah pendinginan pada proses pengecoran. Pada perlakuan pelarutan, satu fasa akan terbentuk, yang dinamakan larutan padat (*solid solution*). Laju pemanasan hingga mencapai temperatur perlakuan pelarutan tidaklah penting, kecuali terdapat lebih dari satu fasa yang tidak terlarut, seperti yang terjadi pada paduan Al-Si-Cu-Mg dan Al-Zn-Cu-Mg. Pada kedua paduan ini, proses perlakuan panas bertahap diperlukan untuk mencegah pelelehan dari fasa yang memiliki titik lebur rendah. Pemilihan lama waktu yang digunakan untuk proses perlakuan pelarutan sangatlah penting untuk menghasilkan sifat mekanis yang unggul. Paduan yang memiliki struktur mikro yang kasar menunjukkan proses pembekuan paduan tersebut lambat, oleh karena itu, dibutuhkan waktu untuk perlakuan pelarutan yang lebih lama.

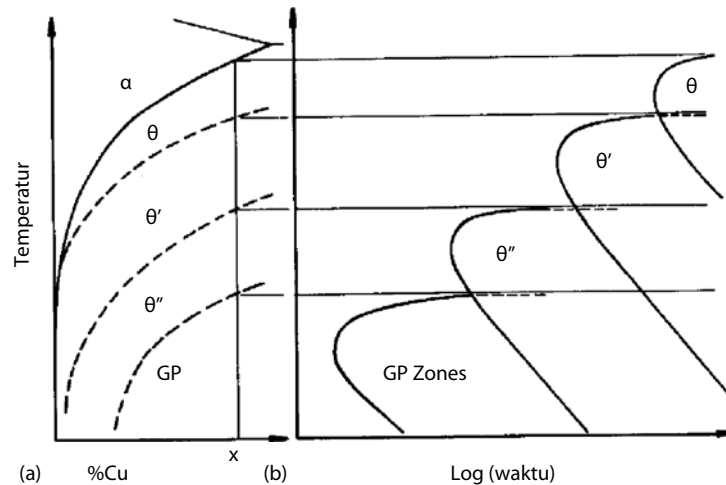
Pencelupan

Pencelupan adalah tahapan kedua setelah proses perlakuan pelarutan, di mana paduan yang telah menjadi larutan padat didinginkan secara sangat cepat dengan tujuan untuk tidak memberikan waktu pada atom-atom yang terlarut dalam matriks logam induk untuk berdifusi sehingga mereka terperangkap di dalamnya. Pencelupan harus dilakukan dengan sangat cepat agar dapat mempertahankan kondisi larutan padat dan jumlah *vacancy* (tempat atom kosong) yang nantinya akan membantu proses pengendapan. Media pencelupan sangat beragam bergantung pada laju pendinginan yang diinginkan. Oli umumnya digunakan untuk menghasilkan laju pendinginan yang tidak begitu cepat. Nitrogen cair umumnya digunakan untuk menghasilkan laju pendinginan yang sangat cepat. Sementara, air digunakan untuk laju pendinginan yang sedang.

Proses pencelupan menghasilkan larutan padat lewat jenuh. Kondisi larutan ini sangat labil. Artinya, apabila tidak langsung dilakukan perlakuan lanjutan, maka akan ada kesempatan bagi atom-atom yang terperangkap untuk berdifusi sehingga kondisi larutan padat lewat jenuh menjadi hilang. Salah satu cara untuk menjaga kondisi larutan padat lewat jenuh adalah dengan menyimpannya di dalam nitrogen cair. Dalam kondisi yang sangat dingin tersebut, atom-atom akan berhenti berdifusi sehingga kondisi ini dapat terjaga.

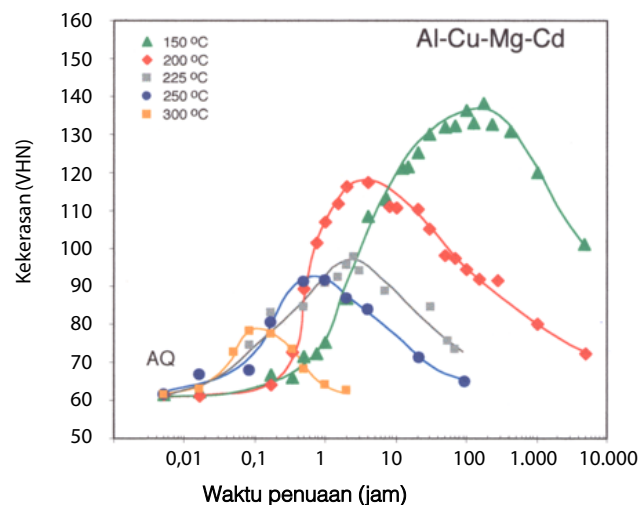
Penuaan

Proses penuaan adalah tahapan proses setelah pencelupan. Pada tahap ini paduan akan dipanaskan pada temperatur tertentu guna memberikan energi pada atom-atom yang terperangkap di dalam matriks logam induk untuk keluar, lalu bereaksi dengan atom lain membentuk senyawa intermetalik dan akhirnya mengendap sebagai endapan dengan skala nanometer. Proses penuaan dapat dilakukan pada dua kondisi, yaitu penuaan buatan dan penuaan alami.



GAMBAR 7.13 (a) Garis-garis "solvus" fasa endapan pada paduan Al-Cu (skematis). (b) Waktu mulai terbentuknya presipitat pada temperatur yang berbeda untuk paduan X pada (a).

Sumber: Diadaptasi dari John E. Hatch (ed.), *Properties and Physical Metallurgy*, (Ohio: American Society for Metals, Metals Park, 1984).



GAMBAR 7.14 Pengaruh temperatur penuaan terhadap respons penguatan pengendapan pada paduan Al-4Cu-0,3Mg-0,1Cd.

Penuaan Buatan

Pada proses penuaan buatan, paduan dipanaskan pada temperatur di atas temperatur ruang. Pemilihan temperatur tersebut didasarkan pada fasa intermetalik yang pertama kali akan diendapkan dalam paduan aluminium tersebut. Gambar 7.13 memperlihatkan pengaruh pemilihan temperatur penuaan terhadap fasa endapan pertama yang terbentuk.

Gambar 7.13 memberikan informasi bahwa apabila temperatur penuaan berada di bawah temperatur garis solvus GP, maka fasa endapan yang akan mengendap pertama kali adalah daerah/zona GP (GP zone). Apabila temperatur yang dipilih terletak di bawah temperatur

pada garis solvus θ' , maka fasa endapan pertama yang akan mengendap adalah θ' . Dengan kata lain, endapan GP zone dan θ'' tidak akan terbentuk. Kurva kekerasan dari proses penuaan yang dilakukan pada berbagai temperatur terhadap paduan Al-Cu-Mg-Cd ditunjukkan pada Gambar 7.14.

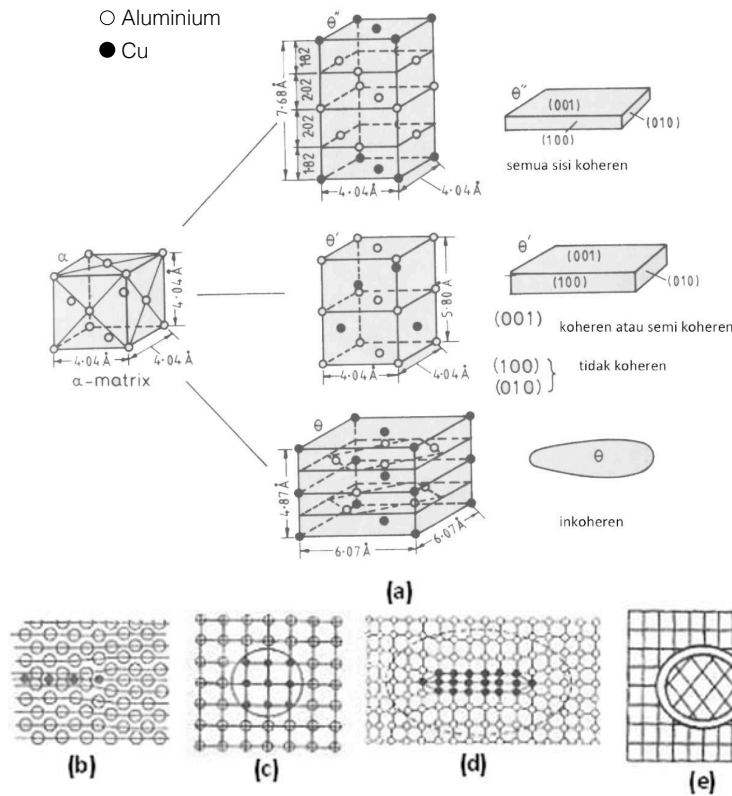
Selain berpengaruh pada fasa endapan pertama yang terbentuk, pemilihan temperatur penuaan juga berpengaruh pada lama waktu untuk mencapai kekuatan atau kekerasan maksimum. Dengan meningkatnya temperatur, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kekuatan atau kekerasan maksimum menjadi lebih singkat. Namun demikian, kekuatan atau kekerasannya menjadi menurun. Fenomena ini juga dapat dilihat pada Gambar 7.14. Pada temperatur penuaan 150°C , kekerasan maksimum pada paduan Al-4Cu-0,3Mg-0,1Cd adalah sekitar 140 VHN dan dicapai dalam waktu lebih dari 200 jam. Sementara, apabila penuaan dilakukan pada temperatur 300°C , kekerasan maksimumnya hanya sekitar 80 VHN, tetapi dicapai hanya dalam 6 menit. Hal ini disebabkan karena peningkatan temperatur menurunkan laju nukleasi (pembentukan inti) endapan dan mempercepat laju pertumbuhan endapan. Akibatnya, peningkatan temperatur menyebabkan jumlah endapan lebih sedikit, tetapi ukurannya lebih besar dan kemampuannya dalam menghambat dislokasi lebih rendah. Oleh karena itu, salah satu tugas dari seorang insinyur dalam konteks ini adalah menentukan temperatur dan durasi proses penuaan untuk mencapai kekerasan optimal sesuai kebutuhan.

Penuaan Alami

Penuaan alami adalah proses penuaan yang dilakukan pada temperatur ruang. Oleh karena itu, untuk mencapai kekerasan maksimum, waktu yang dibutuhkan sangat lama. Sebuah penelitian di Jepang menunjukkan bahwa proses penuaan alami pada paduan Al-4Cu selama 14 tahun belum mencapai kekerasan puncak!

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, proses evolusi pembentukan endapan pada paduan aluminium-tembaga biasanya melalui tahapan pembentukan, sebagai berikut.

1. GP zone adalah susunan atom-atom unsur terlarut yang berdifusi keluar matriks dan membentuk satu lapisan atom tembaga di antara atom aluminium pada lokasi-lokasi tertentu di dalam matriks (Gambar 7.15b). Struktur GP zone ini ditemukan oleh Guinier-Preston pada tahun 1914 di dua negara yang berbeda.
2. θ'' (Al_2Cu) adalah endapan hasil evolusi GP zone yang terus berdifusi sehingga mengalami penebalan menjadi struktur cakram (Gambar 7.15c). Struktur cakram ini adalah koheren, di mana atom-atom unsur tembaga membentuk suatu kelompok yang memiliki struktur mirip dengan matriks aluminium. Endapan θ'' memiliki struktur tetragonal ($a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^{\circ}$) dengan nilai a sama dengan nilai a dari aluminium, yaitu 0,404 nm dan nilai $c = 0,768$ nm.
3. θ' adalah endapan hasil difusi θ'' yang berbentuk pelat. Pada struktur pelat ini, koherensi mulai hilang. Artinya, kelompok atom tembaga mulai terpisah-pisah (Gambar 7.15d). Dengan demikian, susunan atomnya menjadi tidak teratur dalam matriks aluminium. Endapan θ' juga memiliki struktur tetragonal dengan nilai a dan c adalah 0,404 nm dan 0,580 nm. Kekerasan maksimum umumnya dicapai pada kondisi yang merupakan campuran antara struktur θ'' dan θ' .



GAMBAR 7.15 (a) Struktur kristal fasa metastabil θ'' , θ' , dan θ yang dihasilkan selama proses penuaan paduan Al-Cu. (b) Struktur GP zone yang menunjukkan koherensi dengan matriks aluminium, yang kemudian bertransformasi menjadi (c) θ'' (koheren), (d) θ' (semikoheren), dan (e) θ (inkoheren).

4. θ adalah endapan atau fase stabil dari paduan aluminium-tembaga hasil dari difusi θ' difusi θ' yang memiliki komposisi kimia Al_2Cu . Strukturnya sudah inkoheren dan independen (Gambar 7.15e), dengan struktur kristal tetragonal. Namun demikian, nilai a -nya bertambah besar dan nilai c -nya berkurang, menjadi 0,607 nm dan 0,487 nm, secara berturut-turut. Fasa ini tidak akan mengalami evolusi perubahan morfologi kembali karena telah stabil.

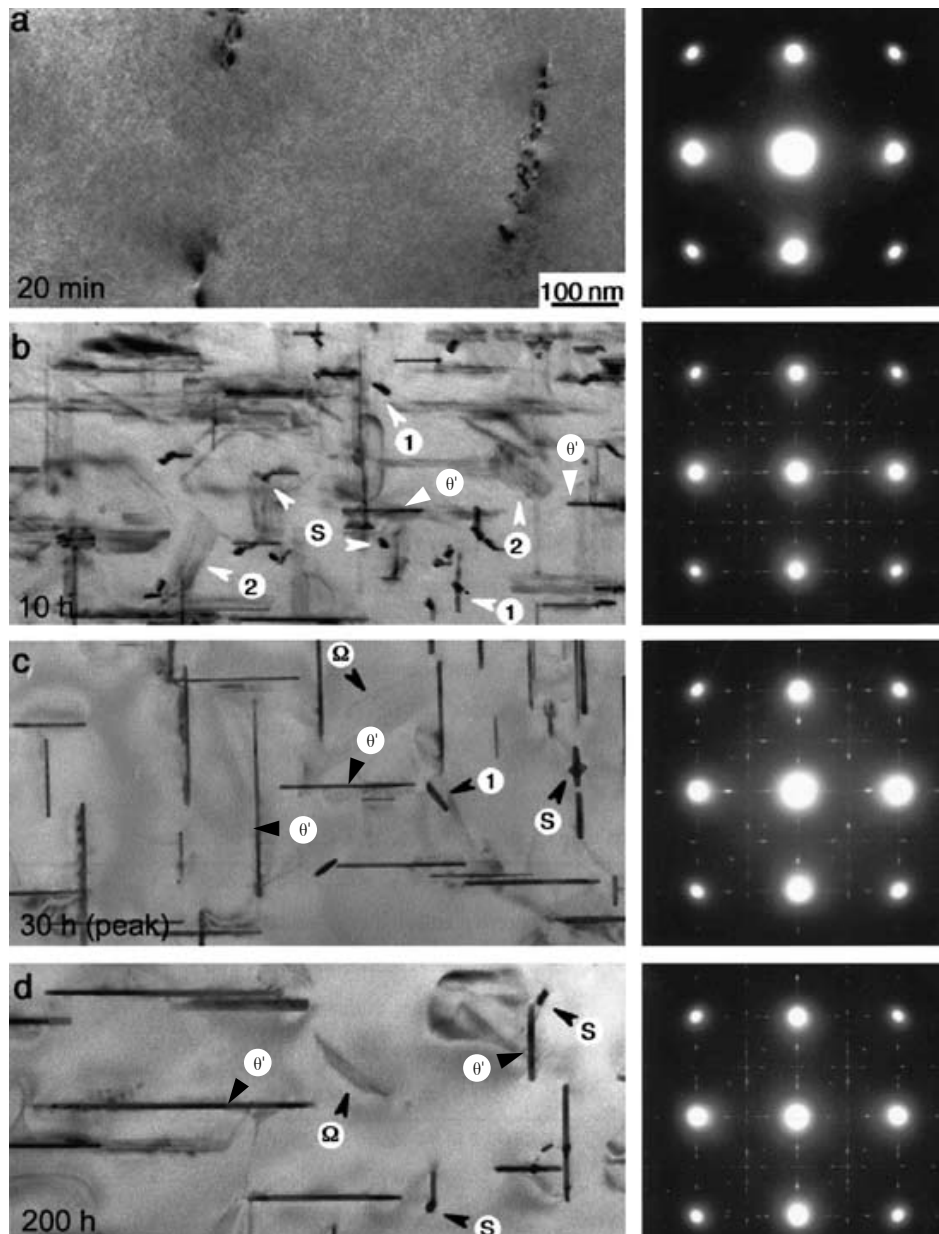
Endapan-endapan ini berskala nanometer. Dengan memainkan fungsi waktu, endapan yang beragam ukurannya akan dihasilkan. Semakin lama proses pemanasan, semakin besar endapan yang akan tumbuh. Secara umum, tahapan pembentukan endapan tersebut dapat dibagi tiga, yaitu (1) sebelum puncak (*underaged*), (2) puncak kekerasan (*peak aged*), dan (3) setelah puncak (*overaged*). Variabel proses penuaan optimal adalah variabel yang sampai pada tahap puncak kekerasan. Pada tahap ini, ukuran endapan optimal dengan dispersi yang efektif untuk menghambat pergerakan dislokasi.

Contoh perubahan kekerasan selama penuaan pada paduan Al-Cu-Mg-Cd dapat dilihat pada Gambar 7.14, dan tahapan proses pembentukan endapan pada paduan Al-Cu-Mg-Cd digambarkan pada Gambar 7.16. Gambar 7.16a menunjukkan bahwa setelah proses penuaan selama 30 detik belum terlihat adanya endapan yang terbentuk. Hanya ada dislokasi helikal pada beberapa tempat. Setelah 15 menit, dislokasi masih tampak (Gambar 7.16b) dan beberapa endapan θ' (Al_2Cu) telah mengendap juga di sekitar dislokasi (tanda panah). Keberadaan θ' pada tahap ini belum menyebabkan peningkatan kekerasan paduan. Setelah 45 menit, dimana kekerasan paduan telah meningkat tajam menjadi ~ 100 VHN, perbedaan besar telah terlihat pada struktur mikro (Gambar 7.16c). Fasa θ' terlihat tersebar merata di seluruh bagian matriks dan terdapat 2 varian yang saling tegak lurus. Selain fasa θ' , fasa σ ($\text{Al}_5\text{Cu}_6\text{Mg}_2$) juga tampak. Fasa σ memiliki morfologi kubik dengan kontras kubik yang sangat jelas. Di beberapa tempat, fasa S (Al_2CuMg) tampak, dimana merupakan fasa minor pada tahap ini. Selain itu, endapan-endapan halus berukuran $\sim 2\text{--}4$ nm yang tersebar merata di seluruh bagian matriks (tanda panah) juga terlihat. Fasa θ' (Al_2Cu) merupakan fasa utama yang memperkuat paduan Al-Cu. Fasa ini memiliki struktur tetragonal dengan *space group* I4/mcm, serta parameter kisi $a = 0,404$ nm dan $c = 0,58$ nm. Fasa ini koheren penuh dengan matriks α pada bidang basalnya, tetapi semikoheren pada normal dari bidang basalnya. Endapan σ ($\text{Al}_5\text{Cu}_6\text{Mg}_2$) berbentuk kubik dengan parameter kisi $a = 0,831$ nm dan *space group* Pm3. Parameter kisi yang besar menyebabkan kontras dari fasa ini dapat terlihat jelas. Sementara itu, fasa S (Al_2CuMg) merupakan fasa yang stabil dalam sistem paduan Al-Cu-Mg dan memiliki struktur ortorombik dengan parameter kisi $a = 0,404$ nm, $b = 0,925$ nm, dan $c = 0,718$ nm. Fasa ini memiliki 12 varian dengan berbagai hubungan orientasi.

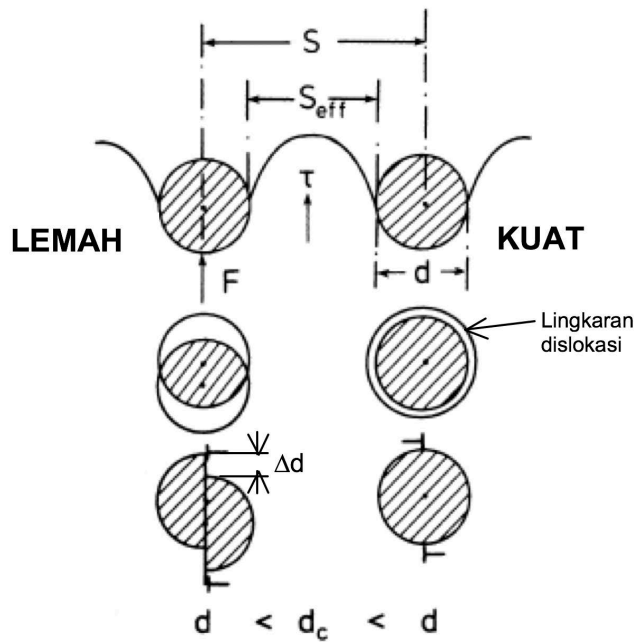
Pada puncak kekerasan setelah 4 jam proses penuaan, fasa θ' telah tumbuh membesar sehingga konsekuensinya terjadi penurunan kepadatan fasa (Gambar 7.16d). Konfigurasi ini memberikan efek terbaik untuk kekerasan paduan. Pada tahap ini, fasa σ terlihat jelas. Di hampir keseluruhan gambar, terlihat fasa Ω (Al_2Cu) yang tampak menyudut terhadap arah berkas elektron. Fasa ini merupakan fasa minor pada paduan Al-Cu-Mg. Setelah melewati puncak (200 jam), fasa θ' semakin menebal dan jumlahnya berkurang (Gambar 7.16e). Hal ini sesuai dengan mekanisme pematangan Oswald (*Oswald ripening*).

Penguatan akibat hadirnya endapan di dalam paduan dapat terjadi melalui dua mekanisme, yaitu (1) pemotongan endapan dan (2) lingkaran (*loop*) dislokasi. Pemotongan endapan dapat terjadi jika endapan berukuran kecil dan relatif lunak, serta lemah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.17a. Endapan yang terpotong memiliki permukaan tambahan (Δd) sehingga energi permukaan meningkat. Selain itu, gerakan dislokasi diperlambat selama proses pemotongan. Kedua hal ini yang menyebabkan terjadinya peningkatan kekuatan di dalam paduan. Sementara, apabila endapan berukuran besar dan keras, serta memiliki jarak yang cukup jauh, maka dislokasi harus membengkok dan membuat suatu lingkaran untuk dapat melewatinya. Hal ini sangat sulit dilakukan karena membutuhkan energi yang sangat besar, di mana berdampak pada peningkatan kekuatan paduan yang cukup besar. Fenomena ini disebut Orowan looping. Terdapat tiga kriteria yang harus dipenuhi penguatan agar Orowan looping menjadi optimal, sebagai berikut:

1. Pada struktur mikro, minimum, terdapat dua fasa yang berbentuk dispersoid yang akan menghambat pergerakan dislokasi di dalam matriks (Gambar 7.18).
2. Diameter dan jarak partikel endapan (S_p) dengan fraksi volume yang sangat kecil ($f \sim \leq 1$) tidak lebih besar dari ukuran atom (b). Dengan demikian, $(b/S_p) \ll 100b$
3. Endapan memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan *looping* dari dislokasi tanpa terjadinya pemotongan partikel (Gambar 7.17b).

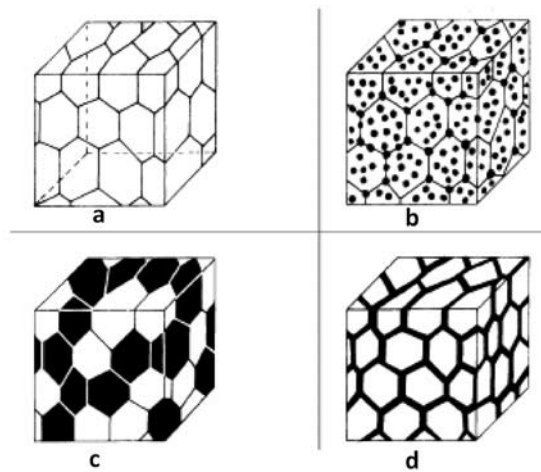


GAMBAR 7.16 Struktur mikro TEM dan pola SAED yang menggambarkan evolusi struktur mikro paduan Al-Cu-Mg-Cd dalam proses penuaan pada temperatur 200°C selama (a) 30 detik, (b) 15 menit, (c) 45 menit, (d) 4 jam, dan (e) 200 jam. Berkas elektron sejajar dengan sumbu zone $\langle 001 \rangle_a$.



GAMBAR 7.17 Proses penghambatan pergerakan dislokasi oleh endapan yang lunak sehingga terpotong (sebelah kiri) dan oleh endapan yang keras sehingga membentuk lingkaran (sebelah kanan).

Sumber: Diadaptasi dari John E. Hatch (ed.), *Properties and Physical Metallurgy*, (Ohio: American Society for Metals, Metals Park, 1984).



GAMBAR 7.18 Beberapa tipe dua fasa dari struktur mikro (a) dispersi, (b) jaringan, (c) sel, dan (d) dupleks

Sumber: Diadaptasi dari John E. Hatch (ed.), *Properties and Physical Metallurgy*, (Ohio: American Society for Metals, Metals Park, 1984).

Pada Gambar 7.17, terdapat simbol d_c , di mana merupakan diameter kritis dari presipitat dan dapat dihitung secara matematis sesuai persamaan berikut.

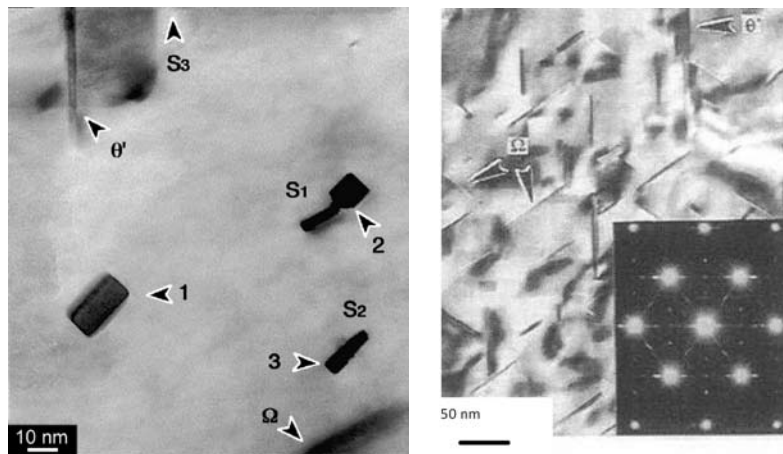
$$d_c = C \frac{Gb^2}{\gamma_{APB}} \quad (7.4)$$

di mana C = faktor geometris G = modulus geser partikel
b = ukuran atom γ_{APB} = energi *antiphase domain boundaries*

Namun, teori tentang diameter kritis hanya akan dibahas sampai di sini. Sementara, penguatan akibat endapan yang terbentuk dapat dihitung sesuai persamaan berikut.

$$\tau_{ppt} = \frac{Gb}{S} \quad (7.5)$$

di mana G = modulus geser; b = panjang vektor burger; dan S = jarak antar-endapan. Endapan yang dihasilkan dari proses penuaan banyak macamnya bergantung pada unsur paduan yang terkandung di dalamnya. Beberapa jenis endapan beragam paduan aluminium ditunjukkan pada Gambar 7.19.



GAMBAR 7.19 Beberapa jenis endapan pada paduan aluminium. (a) Endapan S (Al_2CuMg), θ' (Al_2Cu), dan θ' (Al_2Cu , diberi tanda 1, 2, dan 3) pada paduan Al-Cu-Mg, (b) Ω (Al_2Cu) pada paduan Al-Cu-Mg-Ag-Zn dan pola difraksi elektronnya.

Latihan

1. Jelaskan perbedaan utama antara paduan aluminium yang dapat diperkuat dengan perlakuan panas (*heat treatable alloys*) dan paduan aluminium yang tidak dapat diperkuat dengan perlakuan panas (*non-heat treatable alloys*).
2. Paduan aluminium ringan digunakan untuk rangka utama pada sebuah helikopter. Paduan tersebut mengalami penguatan melalui beberapa proses dan memiliki karakteristik sebagai berikut.
 - Kekuatan tarik intrinsik = 15 MPa
 - Paduan telah mengalami proses deformasi plastis pada temperatur ruang sehingga

$$\tau = \tau_0 + \alpha G b \rho^{\frac{1}{2}}$$

di mana $\alpha = 0,5$, $G = 27 \text{ GPa}$, $b = 2,8 \times 10^{-10} \text{ m}$, dan kerapatan dislokasi sebesar 10^{11} m^{-2} .

- Paduan juga dilaku panas yang menyebabkan pembentukan endapan dengan jarak antarpartikel $0,5 \times 10^{-7} \text{ m}$.
- a. Hitung kekuatan tarik total dari paduan aluminium tersebut. Catatan: hubungan antara tegangan geser dan tegangan tarik dapat dirumuskan: $\tau = 1/2 \sigma$.
 - b. Jika persyaratan minimum menyatakan bahwa rangka utama harus memiliki kekuatan tarik minimum 650 MPa, apakah paduan aluminium tersebut memenuhi persyaratan tersebut?
3. Diameter butir rata-rata paduan kuningan yang diukur sebagai fungsi dari waktu pada temperatur 650°C, ditabulasi pada dua waktu yang berbeda.

Waktu (menit)	Diameter butir (mm)
30	$3,9 \times 10^{-2}$
90	$6,6 \times 10^{-2}$

$d^2 - d_0^2 = K_t$, di mana d_0 adalah diameter butir awal, d adalah diameter butir pada waktu t , t adalah waktu, dan K adalah konstanta.

- a. Berapa diameter butir awal?
- b. Berapa diameter butir setelah 150 menit pada temperatur 650°C?
- c. Jelaskan mengapa diameter butir bertambah jika kuningan didiamkan pada temperatur 650°C?

SIFAT, APLIKASI DAN PEMROSESAN POLIMER

Tujuan Pembelajaran

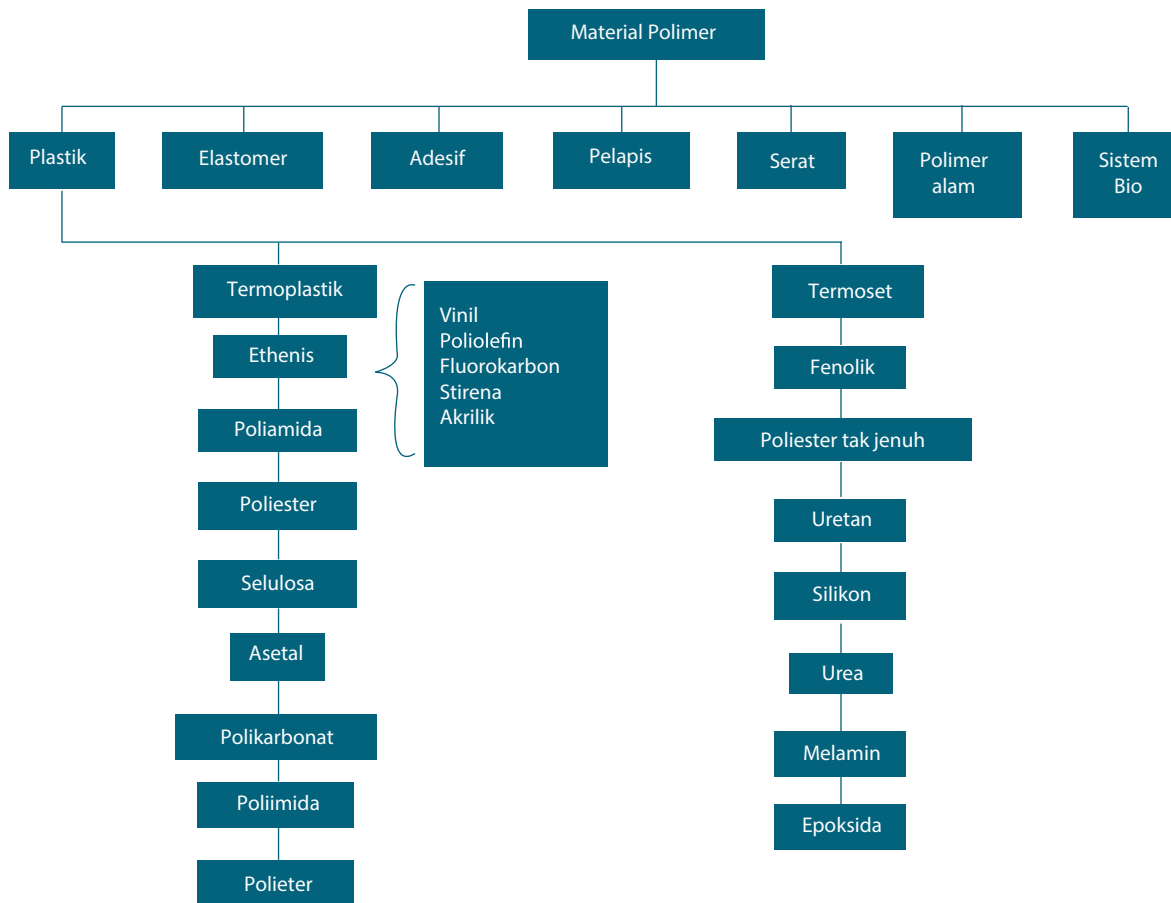
Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

1. Menjelaskan struktur molekul polimer dan pengaruhnya pada sifat fisik dan mekanik polimer.
2. Memahami struktur polimer yang umum ditemukan sehari-hari, seperti PE, PP, PVC, Teflon, dan PS.
3. Memahami perbedaan polimer termoset dan termoplastik.
4. Membuat tiga buah plot tegangan-regangan yang spesifik untuk polimer.
5. Memahami proses pembuatan dan pemrosesan polimer.

8.1 Pendahuluan

Polimer adalah material yang terdiri atas banyak molekul kecil (yang disebut mer), yang dapat disambung satu sama lainnya untuk membentuk rantai yang panjang. Dengan demikian, polimer sering disebut sebagai molekul makro. Umumnya, polimer terdiri atas puluhan ribu monomer.

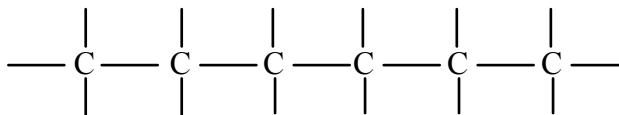
Peradaban manusia telah memanfaatkan berbagai jenis polimer selama berabad-abad, dalam bentuk minyak, resin, dan karet. Akan tetapi, industri modern polimer baru dimulai setelah revolusi industri. Pada akhir periode 1830-an, Charles Goodyear berhasil memproduksi salah satu bentuk karet melalui proses vulkanisasi. Kurang lebih 40 tahun kemudian, selulosa (plastik keras terbuat dari nitroselulosa) berhasil diproduksi secara komersial. Namun demikian, perkembangan polimer melambat hingga periode 1930-an, ketika material vinil, neopren, polistiren, dan nilon mulai dikembangkan. Sejak itu, perkembangan penelitian di bidang polimer terus melaju hingga saat ini. Beragam material polimer dapat diklasifikasikan berdasarkan aplikasinya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.1



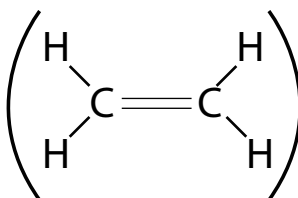
GAMBAR 8.1 Klasifikasi material polimer.

8.2 Molekul Polimer

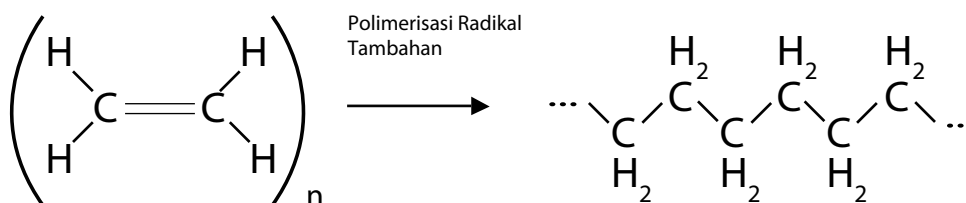
Seperti yang telah dijelaskan, material polimer terdiri atas puluhan ribu monomer yang tersambung dalam suatu rantai molekul. Dalam setiap rantai molekul, atom-atom memiliki ikatan kovalen, serta rantai ini umumnya sangat panjang dan fleksibel. Inti dari rantai adalah jalinan atom karbon, di mana setiap atom karbon memiliki ikatan tunggal dengan atom karbon tetangganya, yang digambarkan secara skematis pada Gambar 8.2. Dua buah elektron valensi lainnya dari atom karbon akan berikatan dengan atom lain atau radikal. Tentu saja, ikatan ganda di antara atom karbon juga dimungkinkan. Beberapa jenis monomer yang banyak dipakai dapat dilihat pada Tabel 8.1.

**GAMBAR 8.2** Rantai atom karbon pada polimer.

Sebagai contoh, dapat diambil molekul gas etana, CH_4 , yang pada suhu ruang dan tekanan atmosfer berada dalam bentuk gas dengan struktur molekul berikatan ganda (lihat Gambar 8.3).

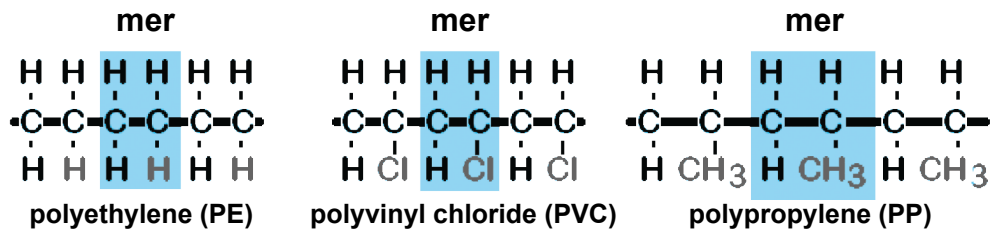
**GAMBAR 8.3** Molekul gas etana, CH_4 , dengan ikatan ganda.

Apabila gas etana berada dalam kondisi katalitik dengan temperatur dan tekanan tertentu, maka monomer etana akan bereaksi dan berubah menjadi polietilen (PE), di mana merupakan material polimer padat. Reaksi tersebut disebut reaksi adisi dan dapat digambarkan seperti pada Gambar 8.4.

**GAMBAR 8.4** Reaksi adisi pada monomer etana yang menghasilkan polietilen (PE).

Jika seluruh atom hidrogen pada polietilen digantikan dengan atom fluor, maka akan terbentuk polimer politetrafluoroetilen (PTFE), yang sering dikenal dengan merek dagang Teflon, lihat Tabel 8.1.

Polivinil klorida (PVC) juga merupakan polimer yang sering ditemukan dalam kehidupan keseharian. Strukturnya merupakan varian dari PE dimana setiap atom hidrogen ke empat digantikan dengan sebuah atom Cl. Lebih jauh lagi, substitusi gugus metil CH_3 untuk setiap atom Cl dalam PVC akan menghasilkan Polipropilen (PP), lihat Gambar 8.5. Jika seluruh monomer dalam sebuah rantai polimer adalah sama, maka polimernya disebut sebagai homopolimer. Bila rantai polimer terdiri dari dua atau lebih monomer, maka polimernya disebut kopolimer.



GAMBAR 8.5 Struktur mer dan rantai dari (a) polietilen, (b) polivinil klorida, (c) polipropilen.

TABEL 8.1 Beberapa jenis mer dari polimer yang umum dipakai.

Polimer	Mer
Polietilen (PE)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$
Polivinil klorida (PVC)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array}$
Politetraflouroetilen (PTFE)	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}$
Polipropilen (PP)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$
Polistiren (PS)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$
Polimetil metakrilat (PMMA)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_3 \end{array}$

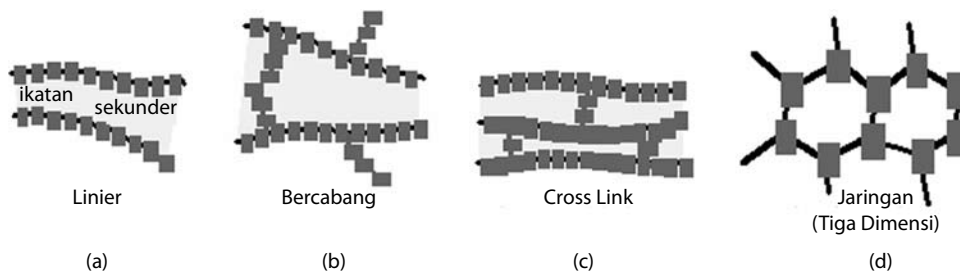
bersambung

TABEL 8.1 (lanjutan).

Polimer	Mer
Fenol-formaldehid (Bakelit)	
Poliheksametilen adipamid (Nylon 6,6)	
Polyetilen tereftalat (PET)	
Polikarbonat	

Keterangan:

* Simbol merupakan simbol dari rantai aromatik.



GAMBAR 8.6 Ilustrasi skematis dari struktur polimer (a) linier, (b) bercabang, (c) *cross-link*, dan (d) jaringan (tiga dimensi). Satu kotak abu-abu menggambarkan satu unit mer.

8.3 Struktur Molekul

Sifat fisik polimer bukan hanya bergantung pada berat molekulnya, tetapi bergantung juga pada struktur rantai molekul. Ada beberapa jenis struktur molekul polimer, yaitu (1) polimer linier (*linear polymer*), (2) polimer bercabang (*branched polymer*), (3) polimer cross-link (*cross-linked polymer*), (4) polimer jaringan/tiga dimensi (*network polymer*)—lihat Gambar 8.6.

Polimer Linier

Polimer linier adalah polimer di mana setiap mer-nya menyambung dari ujung ke ujung membentuk suatu rantai tunggal. Rantai panjang ini fleksibel dan dapat dibayangkan sebagai setumpuk spaghetti, seperti tampak pada Gambar 8.6a, di mana setiap kotak menggambarkan sebuah mer. Untuk polimer linier, ikatan antarrantai adalah ikatan van der Waals dan ikatan hidrogen. Contoh polimer linier adalah polietilen, PVC, polistiren, nilon, polimetilmetakrilat, dan fluorokarbon.

Polimer Bercabang

Pada polimer bercabang, rantai cabang menempel pada bagian tengah rantai utama, seperti tampak pada Gambar 8.6b. Rantai cabang, yang dianggap sebagai bagian dari rantai utama, terjadi karena ada reaksi tambahan saat terjadi polimerisasi. Efisiensi kepadatan menurun dengan adanya rantai cabang sehingga terjadi penurunan kepadatan (densitas) polimer. Polimer linier juga dapat membentuk cabang.

Polimer Cross-Link

Pada polimer *cross-link*, rantai linier yang bersisian disatukan pada beberapa posisi melalui ikatan kovalen, seperti tampak pada Gambar 8.6c. Proses *cross-linking* dapat terjadi selama polimerisasi, atau melalui reaksi kimia tidak dapat balik, yang umumnya terjadi pada temperatur tinggi. Sering kali, *cross-link* dapat terjadi dengan atom atau molekul aditif yang berikatan kovalen dengan rantai utama. Sebagian besar material karet berstruktur *cross-link* setelah mengalami proses vulkanisasi.

Polimer Jaringan (Tiga Dimensi)

Unit mer trifungsi yang memiliki tiga ikatan kovalen aktif akan membentuk jaringan tiga dimensi, seperti tampak pada Gambar 8.6d. Sebenarnya, polimer yang “sangat *cross-link*” dapat diklasifikasikan sebagai polimer jaringan. Material ini memiliki sifat termal dan mekanik yang spesifik. Contoh polimer jaringan adalah epoksi dan fenol-formaldehid.

Perlu dicatat bahwa pada kenyataannya jarang sekali struktur polimer seperti salah satu dari struktur yang telah dijelaskan. Umumnya, struktur polimer adalah campuran dari beberapa struktur. Sebagai contoh, polimer yang sebagian besar berstruktur linier dapat memiliki beberapa struktur cabang dan *cross-link* yang terbatas.

8.4 Polimer Termoplastik, Termoset, dan Elastomer

Salah satu klasifikasi polimer berdasarkan kriteria material rekayasa adalah polimer termoplastik, termoset, dan elastomer. Termoplastik dan termoset dalam kehidupan sehari-hari dikenal sebagai plastik, sedangkan elastomer lebih dikenal sebagai karet.

Polimer Termoplastik

Termoplastik merupakan material yang melunak jika dipanaskan (dan akhirnya akan mencair) dan mengeras jika didinginkan, dan reaksinya dapat balik. Pada temperatur beberapa ratus derajat, termoplastik dapat berubah menjadi cairan kental. Oleh karena itu, termoplastik mudah dan ekonomis untuk difabrikasi menjadi berbagai bentuk. Ketika temperatur dinaikkan, ikatan sekunder antarrantai menghilang sehingga rantai lebih fleksibel. Siklus pemanasan-pendinginan dapat diberikan berulang kali pada termoplastik tanpa degradasi yang berarti. Degradasi pada termoplastik tidak dapat balik jika pemanasan sampai membuat kerusakan pada ikatan kovalen di dalam rantai. Sebagian besar polimer linier dan polimer dengan beberapa cabang dan rantai utama yang fleksibel biasanya adalah termoplastik. Contoh termoplastik adalah PE, PVC, PP, polistiren (PS), dan nilon.

Terdapat dua jenis termoplastik. Jenis termoplastik yang pertama adalah termoplastik yang berstruktur gelas (amorf). Jenis termoplastik ini sangat berguna pada lingkungan yang bertemperatur di bawah temperatur transisi gelas. Temperatur transisi gelas (T_g) merupakan respons rantai polimer terhadap panas sebagai salah satu bentuk energi kinetik. Pada temperatur di bawah T_g , polimer bersifat getas, sedangkan di atas T_g , polimer bersifat ulet bahkan menyerupai karet. Termoplastik yang berstruktur gelas dapat direkayasa menjadi produk yang memiliki tingkat kejernihan tertentu. Termoplastik yang berstruktur gelas ketahanan kimianya kurang dan dapat mengalami retak tegang.

Jenis yang kedua adalah termoplastik berstruktur semi-kristalin. Terminologi semi-kristalin digunakan karena rantai-rantai polimer termoplastik dapat tersusun teratur dalam tingkatan tertentu, di mana menyerupai struktur kristal pada logam. Polimer jenis ini lebih tahan terhadap senyawa-senyawa kimia. Apabila tingkat kristalinitasnya lebih besar dari panjang gelombang cahaya, maka polimer tersebut memiliki kekeruhan yang tinggi atau tidak tembus cahaya.

Polimer Termoset

Faktor yang membedakan termoset dengan termoplastik adalah termoset akan menjadi keras secara permanen jika dibakar dan tidak akan melunak jika dipanaskan. Jika dipanaskan secara berulang, termoset tidak mampu melunak kembali, melainkan akan terdegradasi menjadi arang. Pada saat pemrosesan awal, ikatan kovalen *cross-link* terbentuk di antara rantai molekul yang berdekatan, sehingga gerakan vibrasi dan rotasi pada temperatur tinggi tidak terjadi. Sekitar 10–50% dari rantai termoset berikatan *cross-link*. Hanya pemanasan berlebih yang akan

merusak polimer akibat rusaknya ikatan *cross-link*. Termoset lebih keras dan lebih kuat daripada termoplastik dan memiliki stabilitas dimensi yang lebih baik. Aplikasi termoset biasanya pada komponen-komponen yang digunakan pada temperatur tinggi. Contoh dari termoset adalah epoksi, fenolik, dan beberapa resin poliester.

Polimer Elastomer

Elastomer merupakan material yang mampu memanjang secara elastis ketika dikenakan tegangan mekanis yang relatif rendah. Dalam kehidupan sehari-hari, elastomer lebih umum dikenal sebagai karet (*rubber*). Beberapa elastomer dapat diregangkan hingga 10 kali lipat dan masih mampu kembali sempurna ke ukuran asal.

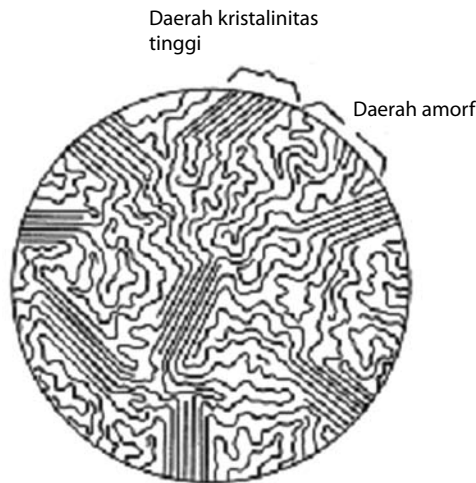
Walaupun perilakunya cukup berbeda dengan termoset, elastomer memiliki struktur yang lebih mirip dengan termoset daripada termoplastik, yaitu berstruktur gelas. Elastomer pada temperatur ruang berada di atas temperatur transisi gelasnya, sehingga pergerakan rantainya lebih besar. Contoh dari elastomer adalah karet alam dan karet sintetis, seperti *stiren-butadien* (SBR), *nitrile butadiene rubber* (NBR), dan *silicone rubber*.

Struktur molekul elastomer dapat dianalogikan seperti spaghetti dan bakso, di mana bakso seperti ikatan silangnya. Elastisitas diperoleh dari kemampuan rantai panjang untuk menata ulang dirinya dan mendistribusikan tegangan. Ikatan silang kovalen memastikan elastomer untuk bisa menata dirinya ke kondisi awal ketika tegangan dihilangkan. Dengan sifat yang dimilikinya tersebut, elastomer dapat direntangkan hingga 700% dari dimensi awalnya. Akan tetapi, hal ini juga bergantung pada jenis elastomernya.

8.5 Polimer Kristalin

Polimer padat dapat berada dalam struktur kristalin atau amorf. Namun demikian, oleh karena ukuran dan kompleksitasnya, polimer umumnya memiliki struktur semi-kristalin, seperti tampak pada Gambar 8.7. Ketidakteraturan rantai akan menyebabkan terjadinya daerah amorf.

Polimer bercabang jarang sekali memiliki derajat kristalinitas yang tinggi karena setiap cabangnya akan memengaruhi proses kristalisasi. Semakin tinggi derajat kristalinitas sebuah polimer, semakin keras dan rapuh polimer tersebut. Derajat kristalinitas bergantung pada laju pendinginan dan konfigurasi rantai. Ketika didinginkan melewati titik lebur, rantai umumnya memiliki konfigurasi yang teratur, karena memiliki waktu yang cukup untuk memosisikan rantainya secara teratur. Kristalinitas biasanya tidak terjadi pada polimer yang terdiri atas mer berstruktur kimia kompleks.



GAMBAR 8.7 Polimer semi-kristalin, yang menunjukkan adanya daerah amorf dan kristalin.

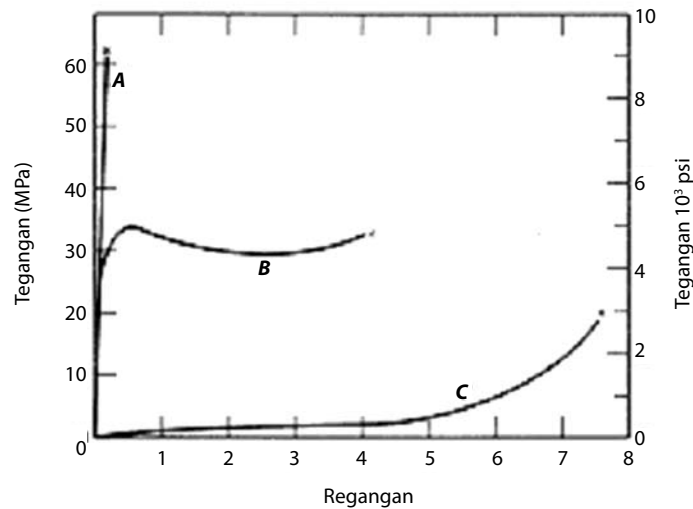
Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

8.6 Perilaku Tegangan-Regangan Polimer

Sifat mekanik polimer dinyatakan dalam parameter yang sama dengan logam, seperti modulus elastisitas, kekuatan tarik, dan kekuatan luluh. Untuk sebagian besar material polimer, proses pengujian tarik sama dengan yang dilakukan pada logam. Tiga jenis grafik tegangan-regangan yang berbeda dan umum untuk polimer ditampilkan pada Gambar 8.8. Grafik A mengilustrasikan polimer rapuh, di mana polimer ini patah ketika berdeformasi elastis. Grafik B menggambarkan polimer plastis, yang hampir sama dengan logam, di mana deformasi awal adalah elastis, yang kemudian diikuti dengan peluluhan daerah plastis. Sementara, grafik C menggambarkan perilaku elastis total, di mana regangan elastis yang besar dapat dihasilkan dengan pemberian tegangan yang rendah. Karakteristik terakhir ini dimiliki oleh material elastomer.

Modulus elastisitas dan keuletan untuk polimer ditentukan dengan cara yang sama dengan cara menentukan modulus elastisitas dan keuletan untuk logam. Untuk polimer plastis, Grafik B pada Gambar 8.8, titik luluh diambil pada titik maksimum, yang terjadi sesaat setelah berakhirnya daerah linier-elastis, di mana tegangan pada titik ini disebut tegangan luluh. Tegangan maksimum diambil pada saat spesimen patah. Tegangan maksimum bisa lebih rendah atau lebih tinggi dari tegangan luluh. Sifat mekanis dari beberapa jenis polimer dapat dilihat pada Tabel 8.2.

Dalam kebanyakan hal, sifat mekanis polimer berbeda dengan logam. Apabila modulus elastisitas polimer berkisar antara 7 MPa–4 GPa, modulus elastisitas logam berkisar antara 48–410 GPa. Kekuatan maksimum polimer adalah sekitar 100 MPa, sedangkan kekuatan maksimum logam adalah sekitar 4.100 MPa. Selain itu, jika polimer yang sangat elastis dapat dideformasi hingga 1.000%, logam sangat jarang dapat dideformasi hingga 100%. Sifat mekanis polimer juga sangat dipengaruhi oleh temperatur.



GAMBAR 8.8 Perilaku tegangan-regangan dari polimer rapuh (A), plastis (B), dan sangat elastis (elastomer) (C).

TABEL 8.2 Sifat mekanis dari beberapa jenis polimer pada temperatur ruang.

Nama Umum	Nama Kimia	Densitas	Kekuatan Tarik (MPa)	Elongasi	Modulus Fleksural (GPa)	Temperatur operasi maksimum (°C)
ABS (high impact)	Akilonitril butadien stiren	1,04	40	8	2,2	70
Akrilik	Polimetilmetakrilat	1,18	70	2	2,9	55
Epoksi		1,2	70	3	3,0	130
LDPE	Polietilen densitas rendah	0,92	10	400	0,2	80
Polikarbonat		1,15	90	100	2,8	115
Poliester	(Misal: polietilen tereptalat)	1,8	50	2	9,0	130
PTFE	Politetrafluoroetilen	2,1	25	200	0,5	180
PVC (fleksibel)	Polivinil klorida	1,3	15	300	0,007	50
PVC (kaku)	Polivinil klorida	1,4	50	60	3,0	90
Silikon		1,4	5	450		240

Sumber: Diadaptasi dari http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0211_pmp/.

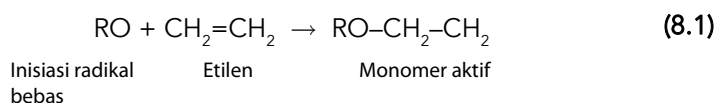
8.7 Proses Pembuatan Polimer

Proses pembuatan polimer dari monomer disebut polimerisasi. Umumnya, material mentah polimer sintesis berasal dari batu bara atau produk minyak bumi, yang terdiri atas molekul dengan berat rendah. Reaksi polimerisasi dapat diklasifikasikan dalam dua kelompok, yaitu (1) polimerisasi adisi, dan (2) polimerisasi kondensasi.

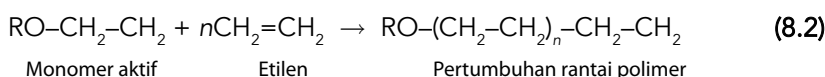
Polimerisasi Adisi

Polimerisasi adisi sering juga disebut sebagai polimerisasi reaksi rantai. Polimerisasi ini merupakan suatu proses di mana unit monomer dilekatkan satu per satu pada rantainya sehingga membentuk molekul linier. Komposisi dari produknya adalah sekian kali dari monomer yang direaksikan. Polimerisasi adisi terjadi dalam 3 tahap.

1. Inisiasi. Pada tahap ini, pembentukan pusat aktif terjadi, yang kemudian dapat berpropagasi melalui suatu reaksi antara katalis dan monomer. Berikut adalah reaksi inisiasi untuk polietilen.



2. Propagasi, yang melibatkan pertumbuhan linier molekul ketika monomer saling menempel satu sama lainnya dalam bentuk rantai molekul. Proses propagasi terjadi cepat, di mana untuk menumbuhkan 1.000 unit diperlukan waktu sekitar 10^{-2} – 10^{-3} detik. Berikut adalah reaksi propagasi dari polietilen.

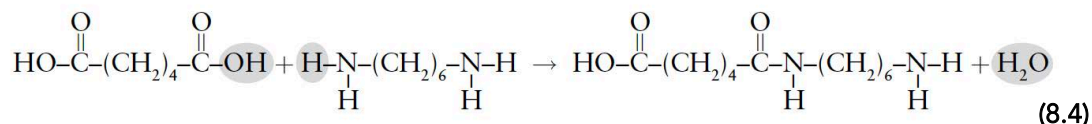


3. Terminasi, yang dapat terjadi dalam dua cara. Pertama, ujung aktif dari dua rantai yang sedang tumbuh bereaksi atau bersatu membentuk molekul tidak reaktif sehingga menghentikan pertumbuhan rantai. Kedua, ujung rantai aktif bereaksi dengan inisiator atau zat kimia yang memiliki satu ikatan aktif.



Polimerisasi Kondensasi

Polimerisasi kondensasi sering juga disebut sebagai polimerisasi reaksi bertahap. Polimerisasi ini adalah pembentukan polimer melalui reaksi kimia intermolekuler secara bertahap, yang biasanya melibatkan lebih dari satu jenis monomer. Reaksi ini biasanya menghasilkan produk samping berupa air. Contohnya adalah reaksi antara monomer asam karboksil dan monomer amina, yang membentuk rantai amida.



Jika molekul air dihilangkan, rantai amida akan terbentuk. Perhatikan bahwa gugus asam tetap berada pada salah satu ujung rantai, yang dapat bereaksi dengan monomer amina lainnya. Demikian pula, gugus amina tetap berada pada ujung lain dari rantai, yang dapat bereaksi dengan monomer asam lainnya. Dengan demikian, monomer dapat terus bergabung untuk membentuk rantai panjang amida. Polimer yang terbentuk disebut poliamida. Polimer ini dikenal dengan nama Nylon-6,6, yang banyak dipakai untuk membuat parasut, tali, dan lain-lain.

8.8 Proses Pembentukan Polimer

Ada beberapa teknik pembentukan polimer. Penentuan teknik pembentukan polimer bergantung pada beberapa faktor, seperti (1) apakah polimernya termoplastik atau termoset, (2) jika termoplastik, pada temperatur berapakah material ini melunak, (3) kestabilan material ketika dibentuk, serta (4) bentuk dan ukuran produk akhir. Banyak kesamaan antara proses pembentukan logam yang telah dibahas pada Bab Pembentukan dan Perlakuan Panas Logam (Bab 6), dan proses pembentukan polimer.

Fabrikasi material polimer umumnya dilakukan pada temperatur tinggi dan dengan aplikasi tekanan. Termoplastik dibentuk pada temperatur di atas temperatur transisi gelas (jika amorf) dan di atas titik lebur (jika semi-kristalin); tekanan harus diberikan ketika produk didinginkan agar bentuknya dapat dipertahankan. Salah satu faktor ekonomis dari termoplastik adalah kemampuannya untuk didaur ulang.

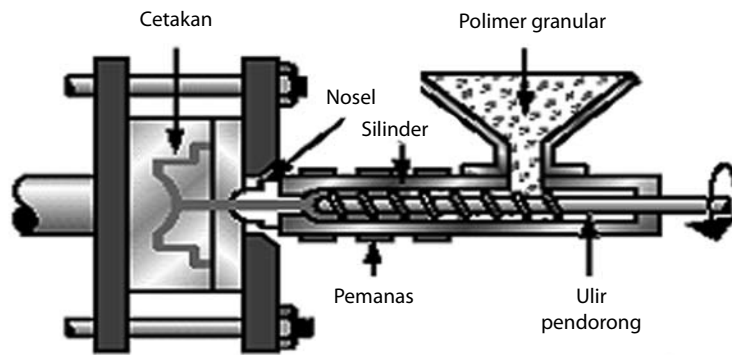
Fabrikasi termoset biasanya dilakukan dua tahap. Pertama adalah persiapan polimer linier (sering disebut *pre-polimer*) sebagai cairan dengan berat molekul rendah. Material ini kemudian diubah menjadi produk yang keras dan kaku pada proses tahap kedua yang biasanya dilakukan di dalam cetakan dengan bentuk tertentu. Tahap kedua ini sering disebut *curing*, yang dapat terjadi dengan pemanasan, dengan penambahan katalis, atau dengan tekanan. Pada saat *curing*, struktur *cross-link* atau jaringan terbentuk. Polimer termoset dapat dikeluarkan dari cetakan saat masih panas karena dimensinya sudah stabil. Polimer termoset tidak dapat didaur ulang, tidak dapat mencair, serta lebih tahan secara kimiawi dan terhadap temperatur yang tinggi.

Injection Moulding

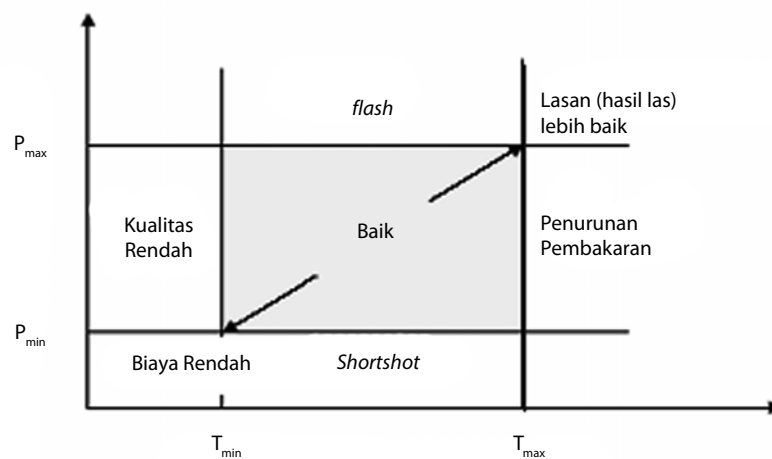
Injection moulding pada polimer identik dengan pengecoran bertekanan pada logam, dan merupakan salah satu teknik pembentukan polimer yang paling banyak digunakan. Ilustrasi skematis dan gambar dari mesin *injection moulding* dapat ditunjukkan pada Gambar 8.9. Berikut adalah tahapan proses *injection moulding*.

1. Sejumlah polimer granular dimasukkan ke dalam tabung pengisi.
2. Polimer granular ini kemudian didorong masuk ke dalam tabung pemanasan menggunakan ulir pendorong sehingga polimer berubah bentuk menjadi cair.
3. Polimer cair kemudian diinjeksikan melalui sebuah nosel ke dalam cetakan yang sudah tertutup. Tekanan dipertahankan sampai produk membeku.
4. Cetakan dibuka dan produk didorong keluar. Cetakan kemudian ditutup kembali dan siklus kembali berlangsung (dimulai dengan tahap pertama).

Untuk termoplastik, waktu satu siklus proses *injection moulding* singkat (sekitar 10–30 detik) karena produk langsung membeku setelah diinjeksikan ke dalam cetakan. Sementara, untuk termoset, waktu yang dibutuhkan agak lama karena *curing* terjadi selama material berada dalam tekanan di dalam cetakan yang bertemperatur tinggi.



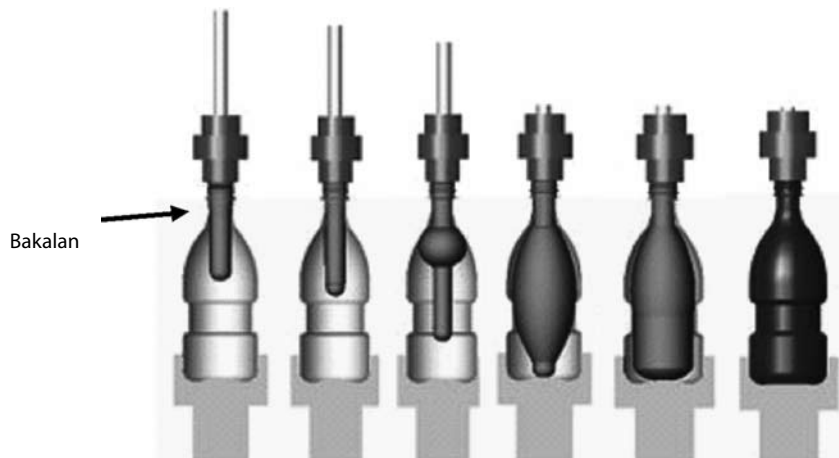
GAMBAR 8.9 Mesin *injection moulding*.



GAMBAR 8.10 Hubungan parameter tekanan (P), temperatur (T), dan karekteristik produk yang dihasilkan pada proses *injection moulding*.



GAMBAR 8.11 Produk-produk yang dihasilkan melalui *injection moulding*.



GAMBAR 8.12 Tahapan proses *blow moulding*.

Sumber: Diadaptasi dari http://en.wikipedia.org/wiki/File:Inside_the_mold.jpg.

Parameter yang harus diperhatikan dalam proses *injection moulding* adalah tekanan dan temperatur. Apabila tekanan dan temperatur terlalu tinggi, maka cacat *flashes* akan terjadi pada produk *injection moulding*, yaitu sirip yang melebar keluar pada garis pemisah dua cetakan. Namun demikian, apabila tekanan dan temperatur terlalu rendah, maka cacat *shortshot* akan terjadi pada produk *injection moulding*, yaitu rongga cetakan tidak terisi sepenuhnya sehingga terdapat kekurangan pada bentuk produk. Pengaruh tekanan dan temperatur pada proses *injection moulding* diilustrasikan pada Gambar 8.10.

Produk-produk hasil proses *injection moulding* meliputi produk yang berukuran besar hingga yang berukuran cukup kecil, demikian juga, produk yang sederhana hingga yang sangat rumit. Produk-produk yang dihasilkan melalui proses *injection moulding*, seperti pesawat telepon, telepon seluler, printer, keyboard (papan tuts), mouse (tetikus), penutup lampu mobil,

dashboard, reflektor, roda gigi, helm, televisi, sisir, roda furnitur, dan lain-lain. Beberapa produk yang dihasilkan melalui *injection moulding* ditunjukkan pada Gambar 8.11.

Blow Moulding

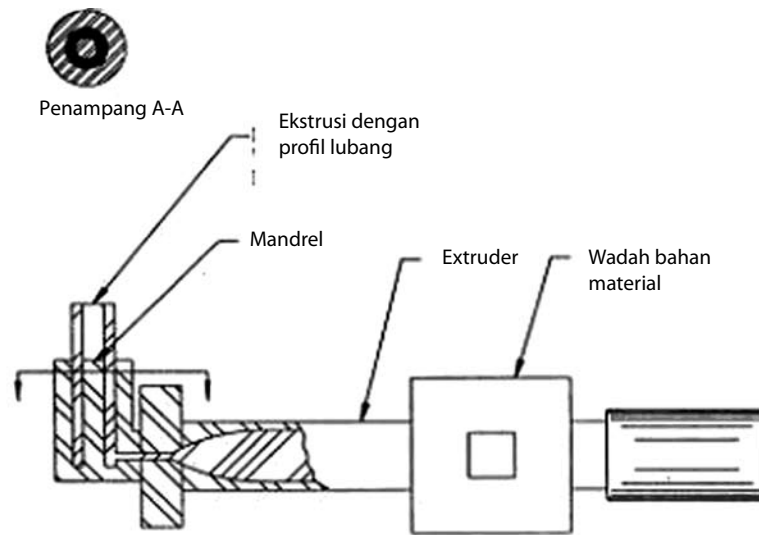
Blow moulding banyak dipakai untuk memproduksi botol plastik. Secara skematis, proses *blow moulding* diilustrasikan pada Gambar 8.12. Mula-mula, bakalan (*preform*) dibuat dengan menggunakan proses *injection moulding*. Bakalan kemudian ditekan ke dalam mesin *blow moulding* menggunakan batangan logam dan dipanaskan di atas temperatur transisi gelasnyanya. Kemudian, udara bertekanan tinggi (5–25 bar) ditiup melalui batangan logam sehingga bakalan berubah bentuk menyentuh dasar cetakan. Tekanan udara kemudian dinaikkan hingga 40 bar, sehingga bakalan menggelembung mengikuti bentuk cetakan.

Secara umum, *blow moulding* digolongkan menjadi tiga jenis, yaitu *extrusion blow moulding*, *injection blow moulding* dan *stretch blow moulding*. Pada proses *extrusion blow moulding*, tabung berongga terlebih dahulu dibuat dengan mesin *extruder*, kemudian peniupan dilakukan seperti pada Gambar 8.12. *Injection blow moulding* menggunakan proses *injection moulding* untuk menghasilkan bakalan berupa tabung yang kemudian dipindahkan ke mesin *blow moulding* melalui *core rod*. Proses ini lebih cocok digunakan untuk menghasilkan produk *blow moulding* dalam jumlah yang banyak. *Stretch blow moulding* melibatkan penekanan dua arah (biaksial) untuk menghasilkan produk dengan kualitas yang tinggi. Bakalan yang digunakan pada proses ini merupakan hasil proses *injection moulding* dan memiliki bagian yang sudah jadi. Sebagai contoh, dalam pembuatan botol minuman, bakalannya sudah memiliki leher dan ulir yang sama seperti produk jadinya.

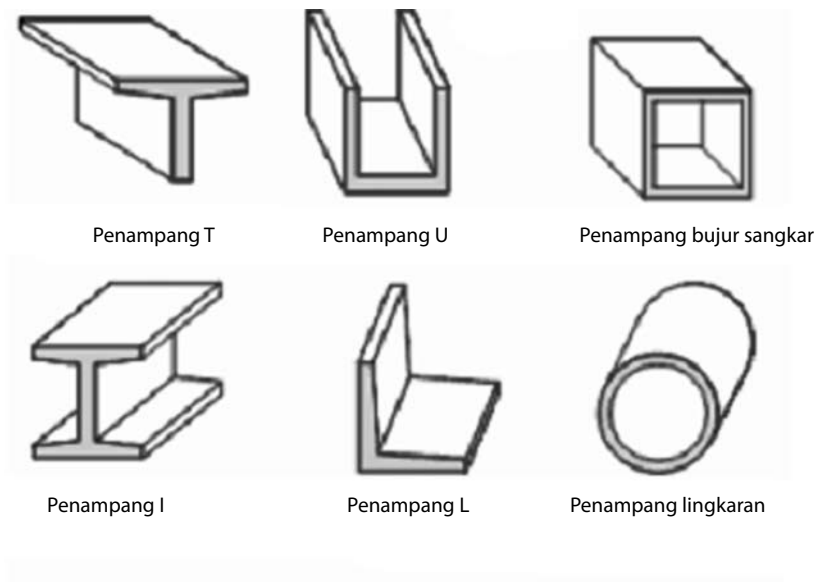
Extrusion Moulding

Extrusion moulding adalah proses pembentukan polimer untuk menghasilkan produk, seperti pipa, selang, sedotan, rel, gorden, dan produk batangan lainnya, yang memiliki bentuk penampang khusus. Mesin yang digunakan dalam proses ini sangat menyerupai mesin pada *injection moulding*. Proses *extrusion moulding* diperlihatkan secara skematis pada Gambar 8.13. Pada proses tersebut, terdapat sebuah motor yang berfungsi untuk memutar ulir pendorong sehingga mendorong polimer granular melewati pemanas. Polimer granular kemudian meleleh, serta ditekan dan didorong melewati cetakan yang memiliki profil atau bentuk tertentu. Proses ekstrusi tersebut dapat dianalogikan seperti menekan dan mengeluarkan pasta gigi dari tempatnya.

Hal yang perlu diperhatikan adalah bentuk dari cetakan yang menentukan bentuk akhir produk. Gambar 8.14 memperlihatkan berbagai jenis penampang produk yang dapat dihasilkan melalui proses *extrusion moulding*. Polimer yang panjang dan memiliki penampang khusus tersebut kemudian didinginkan dan dipotong menjadi sebuah produk. Hasil ekstrusi tidak selalu dipotong, melainkan dapat juga digulung menjadi gulungan yang besar.



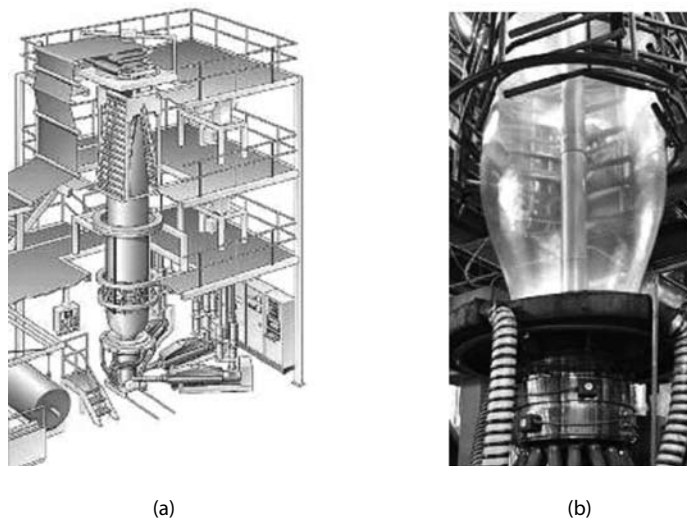
GAMBAR 8.13 Proses *extrusion moulding* untuk membentuk sebuah produk berlubang.



GAMBAR 8.14 Beberapa jenis penampang produk yang dihasilkan melalui proses *extrusion moulding*.

Blown Film Moulding

Blown film moulding adalah sebuah proses pembentukan produk polimer dengan cara menekan lelehan plastik melalui sebuah cetakan berbentuk cincin sehingga membentuk tabung plastik. Tabung tersebut kemudian secara bertahap ditiupkan udara hingga membesar dan membentuk sebuah gelembung plastik besar. Selanjutnya, gelembung didinginkan hingga menjadi



GAMBAR 8.15 (a) Rangkaian skematis proses *blown film moulding*, (b) proses *blown film moulding* untuk membuat kantung plastik dari polietilen.

gelembung plastik yang padat. Sebuah rol di sisi mesin akan memipihkan gelembung tersebut menjadi suatu lembaran plastik dengan dua sisi. Kemudian, plastik digulung menjadi gulungan yang besar dan proses masih terus berlanjut. Terkadang, proses tersebut dilanjutkan dengan proses pemotongan, pencetakan label atau merek, dan penyegelan. Mekanisme proses *blown film moulding* ditunjukkan pada Gambar 8.15.

Penipisan pada polimer terjadi pada arah radial dan longitudinal. Hal yang harus diperhatikan pada proses ini adalah volume udara yang diberikan dan banyaknya plastik cair yang dipasok. Semakin besar jumlah udara yang diinjeksikan, semakin tipis produk yang diperoleh. Sebaliknya, semakin banyak polimer yang dipasok, semakin tebal produk yang diperoleh. Akan tetapi, parameter tersebut biasanya dijaga tetap konstan dalam suatu siklus produksi, sesuai karakteristik produk yang diinginkan.

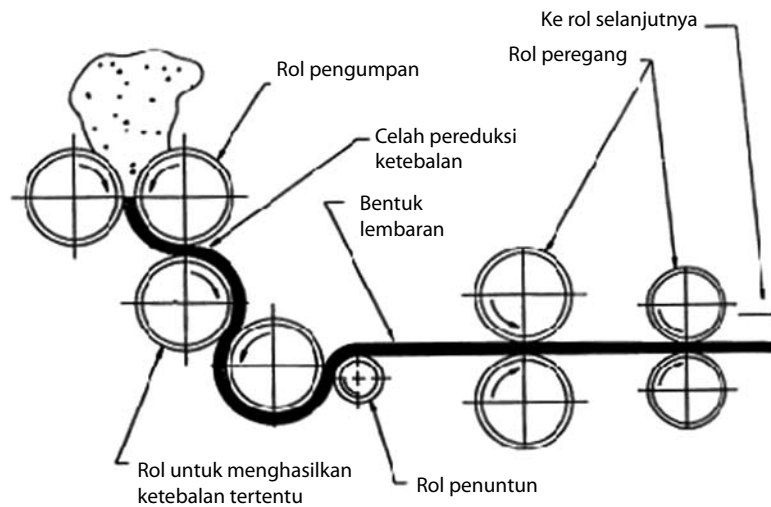
Material yang sering digunakan dalam proses *blown film moulding* adalah material kelompok polietilen, seperti HDPE, LDPE, dan LLDPE. Namun demikian, polimer lain, seperti PP dan PA, juga dapat digunakan sebagai campuran polietilen. Aplikasi polimer yang diproduksi dengan proses ini biasanya berupa kantung dan media pembungkus lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.16.

Sheet Forming

Sheet forming merupakan proses pengolahan polimer menjadi bentuk lembaran dan biasanya digunakan untuk menghasilkan produk setengah jadi, kecuali untuk beberapa jenis pembungkus makanan. Pada proses ini, bahan baku polimer dilewatkan melalui beberapa buah rol hingga terbentuk produk lembaran yang memiliki ketebalan tertentu.

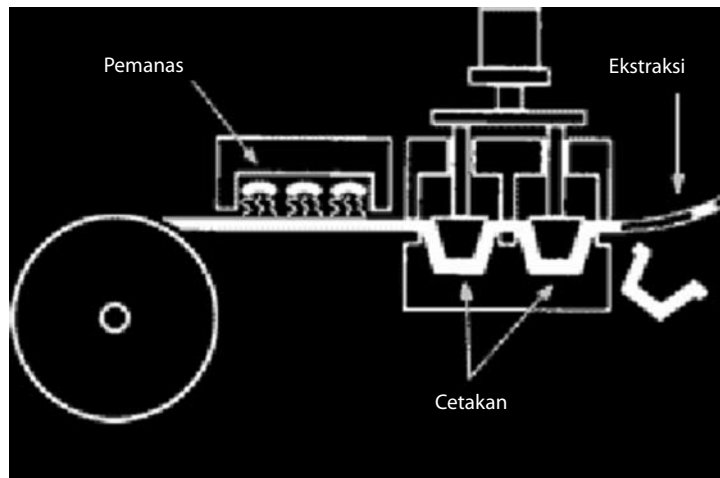


GAMBAR 8.16 Pemakaian produk hasil *blown film moulding* pada pembungkus makanan dan obat-obatan.



GAMBAR 8.17 Ilustrasi skematis proses *sheet forming*. Proses ini umumnya dilakukan untuk memproduksi produk plastik tipis, yang dapat digunakan untuk pembungkus makanan dan bahan baku dalam proses *thermoforming*.

Ketebalan yang diinginkan dapat diatur dengan mengatur susunan rol pada tingkat tertentu. Hasil dari proses *sheet forming* ini adalah bahan baku material untuk diproses lebih lanjut pada proses *thermoforming*. Proses *sheet forming* juga sering disebut dengan *calendering*. Gambar 8.17 memperlihatkan ilustrasi skematis dari proses *sheet forming*.



GAMBAR 8.18 Ilustrasi skematis proses *thermoforming*. Bahan baku proses ini adalah lembaran plastik yang berasal dari proses *sheet forming*.

Thermoforming

Thermoforming merupakan proses yang sangat umum digunakan untuk menghasilkan produk plastik berbentuk cekung seperti wadah. Contoh produk yang diproses secara *thermoforming* adalah nampan dan wadah es krim. Material yang digunakan untuk proses ini haruslah termoplastik yang sudah dibentuk menjadi lembaran melalui proses *sheet forming*. Lembaran plastik pada awalnya dipanaskan secara kontinu melalui sebuah pemanas, kemudian dimasukkan ke bagian pencetakan, dan dipotong menjadi produk yang diinginkan. Ilustrasi skematis proses tersebut diperlihatkan pada Gambar 8.18. Pada umumnya, pabrik-pabrik yang memproduksi produknya melalui proses *thermoforming* memanfaatkan sisa plastik yang tidak terpakai pada proses sebelumnya untuk dijadikan bahan baku. Sisa plastik dibentuk kembali menjadi lembaran melalui proses *sheet forming*. Ketebalan produk pada proses *thermoforming* bergantung pada ketebalan material awal hasil proses *sheet forming*, biasanya berkisar antara 1,5 hingga 3 mm. Gambar 8.19 memperlihatkan berbagai contoh produk hasil *thermoforming*.

Rotational Moulding

Rotational moulding (biasa disingkat *rotomoulding*) merupakan suatu proses yang biasa digunakan untuk memproduksi produk plastik berongga. *Rotomoulding* merupakan proses yang paling efektif dan efisien dalam pembuatan produk plastik berongga dengan ukuran besar. Dalam proses ini, resin polimer dimasukkan ke dalam cetakan dan dipanaskan dengan cara diputar-putar. Pemutaran yang dilakukan terjadi pada arah vertikal dan horizontal. Pemanasan dan pemutaran yang simultan mampu mendistribusikan material ke bagian-bagian yang sulit dicetak sehingga terjadi pemerataan. Ilustrasi proses *rotomoulding* dapat dilihat pada Gambar 8.20.

Rotomoulding terdiri dari empat tahapan proses, yaitu pemuatan, pemanasan, pendinginan, dan pelepasan. Pada proses pemuatan, polimer resin yang sudah diukur jumlahnya dimasukkan ke dalam cetakan. Beberapa cetakan mungkin dapat dipasang pada satu mesin dalam satu kali siklus. Tahap kedua dimulai ketika cetakan yang telah penuh ditutup dan dipindahkan ke dalam oven, kemudian keduanya diputar pada sumbu vertikal dan horizontal secara perlahan. Oleh karena ada panas yang masuk ke cetakan dan gerakan berputar, lelehan resin akan melekat ke bagian cetakan dan terjadi pemerataan. Selanjutnya, proses pendinginan polimer dilakukan. Selama tahapan ini cetakan akan terus dipertahankan dalam keadaan berputar, sementara udara, semburan air, atau gabungan keduanya secara bertahap akan mendinginkan produk. Tujuan dipertahankannya cetakan agar tetap berputar adalah untuk mempertahankan bentuk produk dengan ketebalan yang merata.



GAMBAR 8.19 Produk-produk hasil proses *thermoforming*, seperti tempat makan, wadah kue, serta gelas es krim dan minuman ringan.

Produk hasil *rotational moulding* biasanya produk berukuran besar yang berongga baik yang berbentuk bulat atau pun menyerupai kubus misalnya tangki air, portal, drum besar, pembatas jalan, ember dan tempat sampah. Produk-produk hasil *rotational moulding* dapat dilihat pada Gambar 8.21.



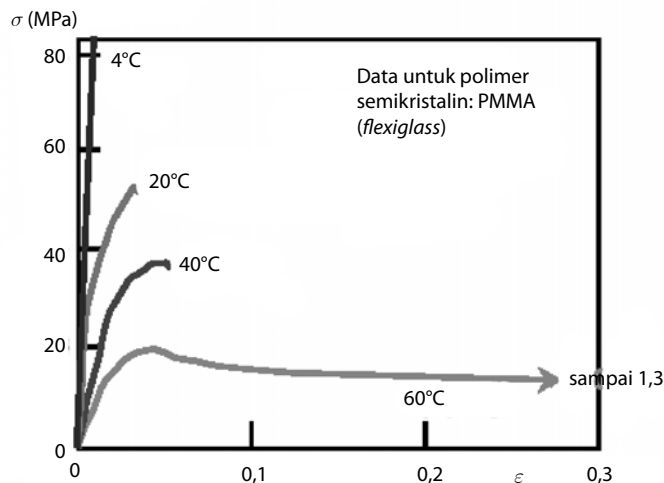
GAMBAR 820 Proses *rotational moulding*. Pada proses ini plastik dipanaskan dan didinginkan dalam keadaan berputar sehingga distribusi polimer akan merata.



GAMBAR 821 Produk-produk hasil *rotational moulding*, seperti portal, drum besar, pembatas jalan, ember, dan tempat sampah.

Latihan

1. Dari grafik tegangan-regangan polimetilmetakrilat (PMMA) berikut, tentukan modulus elastisitas dan kekuatan tarik pada temperatur ruang dan bandingkan dengan nilai yang diberikan pada Tabel 8.2.



2. Berdasarkan struktur molekulnya, buatlah sketsa struktur monomer dari polimer berikut:
 - (a) polivinil fluorida,
 - (b) poliklorotrifluoroetilen, dan
 - (c) polivinil alkohol.
3. Bandingkan antara polimer termoset dan termoplastik
 - (a) berdasarkan sifat mekanisnya ketika dipanaskan, dan
 - (b) berdasarkan struktur molekulnya.
4. (a) Bandingkan kondisi kristalin pada logam dan polimer.
 (b) Bandingkan kondisi nonkristalin pada polimer dan gelas.
5. Jelaskan mekanisme ketika polimer semikristalin
 - (a) berdeformasi elastis,
 - (b) berdeformasi plastis,
 - (c) karet berdeformasi elastis.
6. Jelaskan perbedaan antara proses polimerisasi adisi dan kondensasi.
7. Mengapa ban umumnya terbuat dari karet?
8. Jelaskan perbandingan sifat antara elastomer dan plastik.
9. Gambar ini adalah sebuah botol air mineral, yang terdiri dari 3 komponen, yaitu: (1) botol, (2) tutup, dan (3) lembaran label merk. Botol terbuat dari PET (Polyethylene terephthalate), tutup terbuat dari HDPE (High Density Polyethylene), dan label merk terbuat dari PVC (Poly Vinyl Chloride).
 - A. Tuliskan monomer dari ketiga jenis polimer tersebut.
 - B. Apakah ketiga jenis polimer tersebut dapat didaur ulang? Jelaskan. Ketika memproses botol bekas, pemulung biasanya membuang lembaran label merk. Mengapa demikian? Jelaskan dalam hubungannya dengan proses daur ulang.
 - C. Bagaimana pemrosesan botol tersebut?



SIFAT, APLIKASI, DAN PEMROSESAN KERAMIK

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

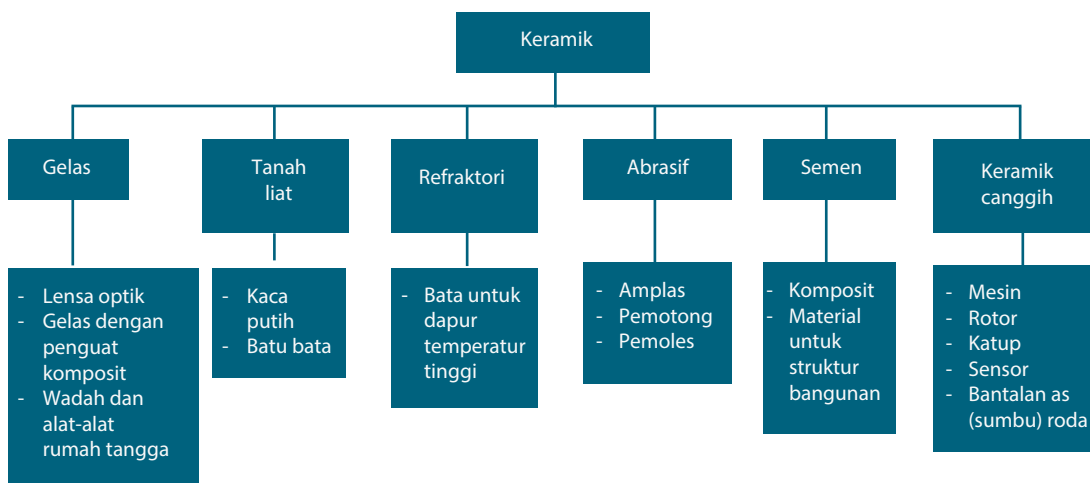
1. Memahami sel satuan natrium klorida, sesium klorida, zinc blende, intan, dan fluorit.
2. Menjelaskan mengapa kekuatan patah dapat sangat bervariasi untuk material keramik yang sama.
3. Memahami pemrosesan keramik.

9.1 Pendahuluan

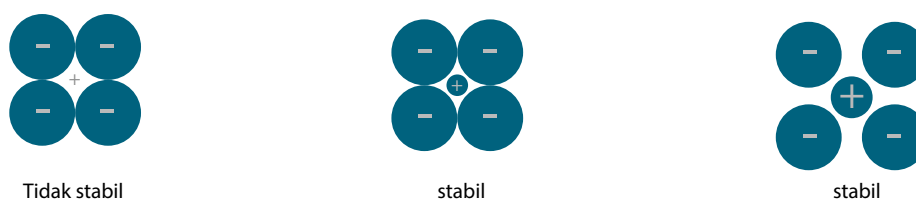
Kata keramik berasal dari bahasa Yunani, yaitu *"keramikos"* yang artinya "bahan yang terbakar", yang menggambarkan bahwa sifat yang diinginkan dari material ini dapat diperoleh dengan cara pembakaran. Hingga 50 tahun yang lalu, material penting dalam kategori keramik adalah keramik tradisional, yang terbuat dari tanah liat. Saat ini, pemahaman mengenai struktur keramik telah berkembang sehingga material keramik memasuki dimensi yang baru, sebagai material elektronik, komputer, komunikasi, angkasa luar, dan lain-lain. Bagi ahli teknik, keramik mencakup berbagai jenis bahan seperti gelas, bata, batuan, beton, amplas, enamel porselen, isolator dielektrik, batu tahan api, dan lain-lain. Klarifikasi material keramik dapat dilihat pada Gambar 9.1. Keramik biasanya merupakan isolator, tidak dapat diubah bentuknya dan sangat stabil dalam lingkungan yang cukup ekstrem. Sebagian besar keramik berstruktur kristalin dan merupakan senyawa antara unsur logam dan nonlogam, di mana ikatan atomnya dapat merupakan ikatan ionik seluruhnya, ikatan kovalen seluruhnya, atau campuran keduanya. Berbeda dengan logam, elektron bebas dalam struktur keramik sangat sedikit. Elektron-elektron tersebut dibagi dengan atom-atom yang berdekatan dalam ikatan kovalen atau berpindah dari atom satu ke yang lainnya membentuk ikatan ion, sehingga atom menjadi terionisasi dan bermuatan.

9.2 Klasifikasi Keramik

Berdasarkan aplikasinya, keramik dapat diklasifikasikan sesuai dengan Gambar 9.1. Terlihat bahwa gelas termasuk keramik. Sementara, komposisi dari beberapa jenis gelas dan keramik gelas dapat dilihat pada Tabel 9.1.



GAMBAR 9.1 Klasifikasi keramik berdasarkan aplikasinya.



GAMBAR 9.2 Konfigurasi koordinasi anion-kation yang stabil dan tidak stabil.

TABEL 9.1 Komposisi dan karekteristik dari beberapa jenis gelas komersial.

Jenis Gelas	Komposisi (% berat)						Sifat dan Aplikasi
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Lainnya	
Silika gabungan	> 99,5						Titik lebur tinggi, koefisien ekspansi termal rendah (tahan kejut panas)
96% Silika (Vycor)	96				4		Tahan kimia dan kejut panas, untuk alat laboratorium
Borosilikat (Pyrex)	81	3,5		2,5	13		Tahan kimia dan kejut panas, untuk oven
Container (soda kapur)	74	16	5	1		4 MgO	Titik lebur rendah, mudah dikerjakan, awet
Serat gelas	55		16	15	10	4 MgO	Mudah ditarik menjadi komposit gelas polimer
Batu api optis	54	1				37 PbO, 8 K ₂ O	Densitas dan indeks refraksi tinggi
Keramik-gelas (pyroceram)	43,5	14		30	5,5	6,5 TiO ₂ , 0,5 As ₂ O ₃	Mudah difabrikasi, kuat, tahan kejut panas, untuk oven

9.3 Struktur Kristal Keramik

Keramik terdiri atas minimal dua jenis unsur. Oleh karena itu, struktur kristalnya lebih kompleks daripada logam. Ikatan atom pada keramik bervariasi dari ikatan ionik murni hingga ikatan kovalen murni, yang bergantung pada elektronegativitas unsur penyusun. Untuk keramik yang memiliki ikatan ionik murni, struktur kristalnya terdiri atas ion-ion bermuatan, bukan atom seperti pada logam. Berikut adalah faktor-faktor yang memengaruhi struktur kristal keramik ionik.

1. Jumlah muatan dari masing-masing ion penyusun.

Kristal keramik harus netral, di mana muatan positif harus sama dengan muatan negatif. Hal ini tergambar dari rumus kimia senyawa keramik. Sebagai contoh, setiap ion Ca memiliki muatan +2 dan ion F memiliki muatan -1, sehingga senyawa keramik yang terbentuk adalah CaF_2 .

2. Ukuran relatif kation dan anion.

Hal ini berkaitan dengan radius kation, r_c , dan radius anion, r_a . Oleh karena kation melepaskan elektron, maka ukurannya biasanya lebih kecil daripada anion, sehingga rasio r_c/r_a lebih kecil dari satu. Setiap ion cenderung memiliki ion tetangga berlawanan muatan sebanyak mungkin. Struktur kristal keramik yang stabil adalah jika seluruh anion menempel dengan kation disekelilingnya (lihat Gambar 9.2). Bilangan koordinasi (yaitu jumlah anion tetangga dari sebuah kation) berhubungan dengan rasio radius kation-anion. Untuk setiap bilangan koordinasi, ada nilai minimum r_c/r_a agar terbentuk struktur yang stabil, yang nilainya semata-mata berdasarkan faktor geometri. Bilangan koordinasi meningkat dengan bertambahnya r_c/r_a . Bilangan koordinasi dari beberapa kation-anion ditunjukkan pada Gambar 9.3.

Struktur Kristal Tipe AX

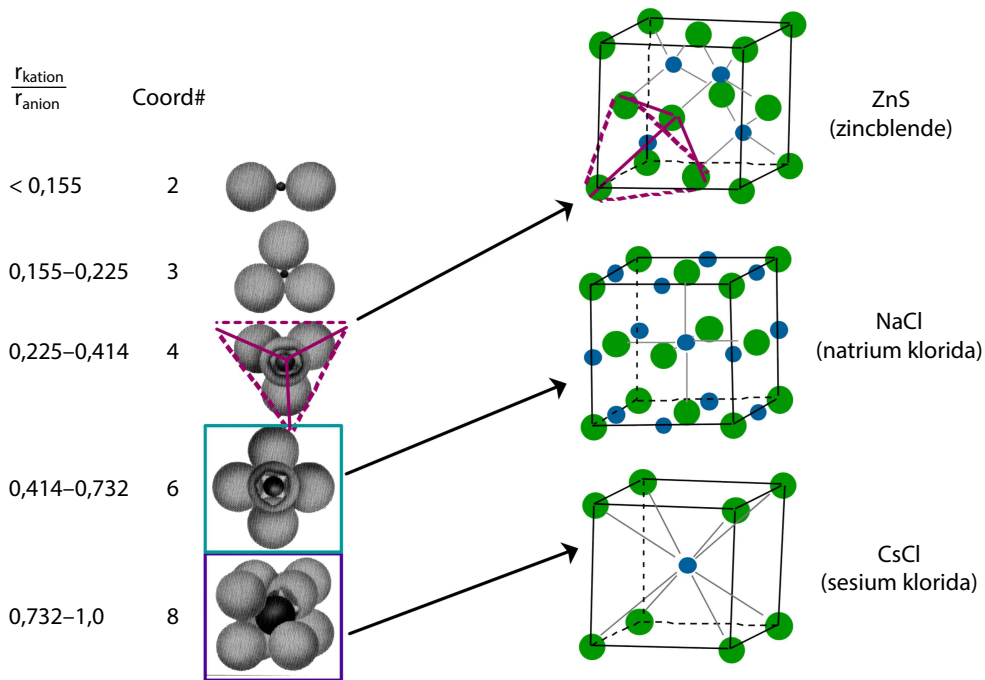
Pada struktur ini, terdapat jumlah anion yang sama dengan jumlah kation. Ada beberapa jenis struktur AX, yang diberi nama sesuai dengan material yang umum memiliki struktur ini.

Struktur Garam

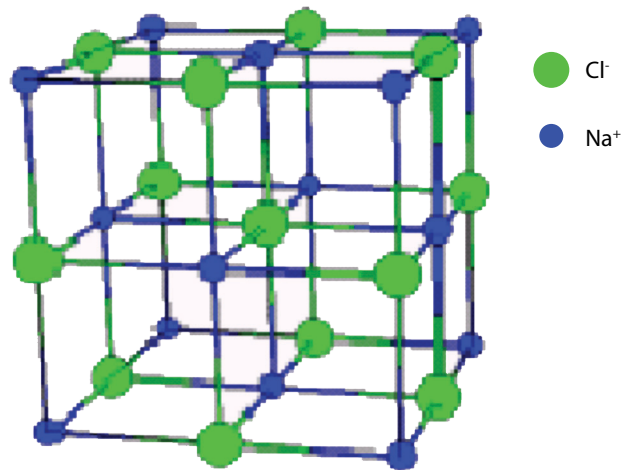
Natrium Klorida (NaCl) merupakan material paling dikenal yang memiliki struktur ini (lihat Gambar 9.4). Bilangan koordinasinya adalah 6 dan r_c/r_a berkisar antara 0,414 hingga 0,732. Sel satuan merupakan struktur FCC Na dan Cl yang saling menyatu. Contoh material lain dengan struktur kristal ini adalah: MgO , MnS , LiF , dan FeO .

Struktur Sesium Klorida

Gambar 9.5 menunjukkan struktur kristal sesium klorida (CsCl), dengan bilangan koordinasi delapan untuk kedua ion. Anion berlokasi di pojok sel satuan, dan kation berada di pusat. Struktur ini bukan BCC karena melibatkan dua jenis ion, tetapi merupakan struktur kubik sederhana.



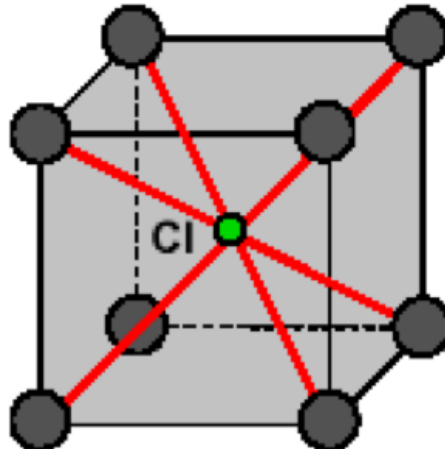
GAMBAR 9.3 Bilangan koordinasi dan rasio r_c/r_a untuk beberapa kation-anion.



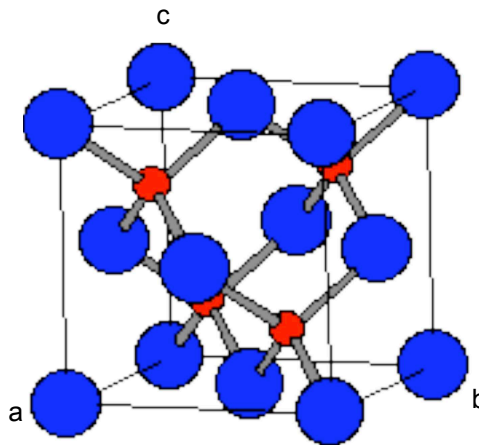
GAMBAR 9.4 Struktur garam (NaCl).

Struktur Zinc Blende

Bilangan koordinasi adalah 4, dan semua ion terkoordinasi dalam struktur tetrahedral. Struktur ini diberi nama *zinc blende* atau *sphalerite*, sesuai dengan nama mineral dari seng sulfida (ZnS). Sel satuan dari ZnS ditampilkan pada Gambar 8.6, di mana seluruh pojok dan permukaan sel kubik diisi oleh ion S^{2-} . Sementara itu, ion Zn^{2+} mengisi posisi tetrahedral di dalamnya. Posisi kedua ion dapat saling bertukar sehingga setiap atom terikat dengan empat atom tetangganya.



GAMBAR 9.5 Struktur sesium klorida (CsCl).



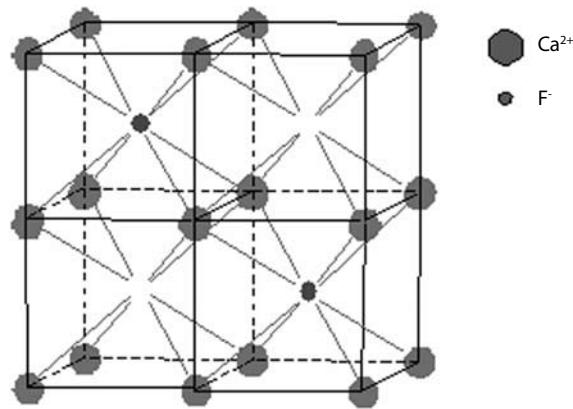
GAMBAR 9.6 Struktur seng sulfida (ZnS).

Struktur Kristal Tipe A_mX_p

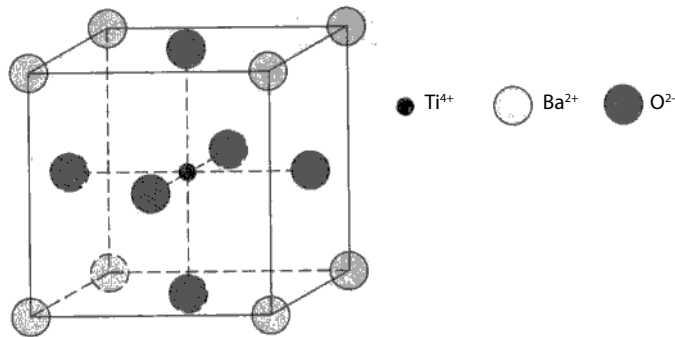
Jika muatan kation dan anion tidak sama, senyawa dengan rumus kimia A_mX_p akan terbentuk, di mana $m \neq p \neq 1$. Contoh dari struktur ini adalah fluorit (CaF_2). Rasio r_c/r_a sekitar 0,8 dengan bilangan koordinasi delapan. Posisi ion kalsium adalah di pusat kubus dengan ion fluor di pojok, tetapi hanya setengah dari posisi pusat diisi oleh ion kalsium. Satu sel satuan terdiri dari delapan kubus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.7. Senyawa lain yang memiliki struktur ini adalah UO_2 , PuO_2 , dan ThO_2 .

Struktur Kristal Tipe $A_mB_nX_p$

Dimungkinkan juga bahwa struktur kristal keramik memiliki lebih dari satu kation (dilambangkan dengan A dan B), sehingga rumus kimianya menjadi $A_mB_nX_p$. Contohnya adalah barium titanat (BaTiO_3), yang memiliki kation Ba^{2+} dan Ti^{4+} . Struktur kristalnya sering disebut struktur kristal perovskit dan memiliki sifat elektromekanis yang menarik, yang sering disebut sebagai piezoelektrik. Pada temperatur di atas 120°C , struktur kristalnya



GAMBAR 9.7 Struktur fluorit (CaF_2).



GAMBAR 9.8 Struktur kristal perovskit (barium titanat— BaTiO_3).

bertransformasi menjadi kubus. Sel satuan dari struktur ini digambarkan pada Gambar 9.8. Keseluruhan struktur kristal keramik yang umum dirangkum pada Tabel 9.2. Perlu diingat bahwa banyak struktur kristal keramik lainnya yang tidak dibahas di dalam buku ini.

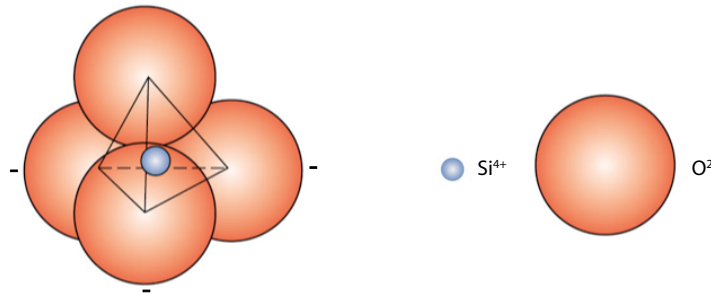
9.4 Keramik Silikat

Silikat adalah material dengan unsur utama silikon dan oksigen, yang merupakan dua unsur terbanyak di kerak bumi sehingga sebagian besar tanah, batuan, pasir, dan tanah liat tergolong dalam klasifikasi silikat (atau mengandung silikat). Alih-alih mendiskusikan struktur kristal silikat berdasarkan sel satuan, lebih menarik untuk membahasnya dengan menggunakan berbagai susunan tetrahedral ion SiO_4^{4-} (Gambar 9.9). Setiap atom silikon diikat dengan empat buah atom oksigen, yang berada pada pojok tetrahedron, sementara itu, ion silikon berada di tengah. Unit dasar ini sering dianggap bermuatan negatif.

TABEL 9.2 Rangkuman beberapa struktur kristal keramik yang umum.

Nama Struktur	Tipe Struktur	Kumpulan Anion	Bilangan Koordinasi		Contoh
			Anion	Kation	
Garam (natrium klorida)	AX	FCC	6	6	NaCl, MgO, FeO
Sesium Klorida	AX	Kubik Sederhana	8	8	CsCl
Zinc Blende (sphalerit)	AX	FCC	4	4	ZnS, SiC
Fluorit	AX ₂	Kubik Sederhana	8	4	CaF ₂ , UO ₂ , ThO ₂
Perovskit	ABX ₃	FCC	12(A) 6(B)	6	BaTiO ₂ , SrZrO ₃ , SrSnO ₃
Spinel	AB ₂ X ₄	FCC	4(A) 6(B)	4	MgAl ₂ O ₄ , FeAl ₂ O ₄

Sumber: Diadaptasi dari W.D. Kingery, H.K. Bowen, dan D.R. Uhlmann, *Introduction to Ceramic*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1976).

**GAMBAR 9.9** Sebuah tetrahedron Si-O (SiO_4^{4-}).

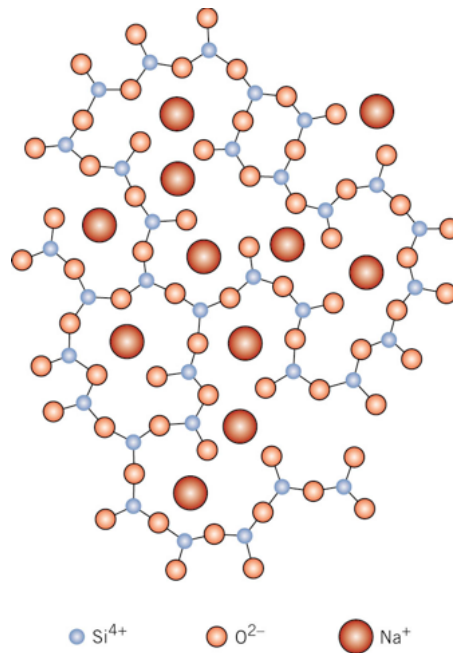
Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010, Gambar 12.9.

Sering kali, silikat tidak dianggap sebagai material yang memiliki ikatan ionik karena adanya ikatan kovalen di antara Si-O, yang terarah dan kuat. Tanpa memperhatikan jenis ikatan Si-O, setiap tetrahedron SiO_4^{4-} memiliki muatan -4 karena setiap atom oksigen memerlukan 4 elektron tambahan untuk mencapai struktur elektron yang stabil. Berbagai jenis struktur silikat dapat terbentuk melalui kombinasi susunan 1, 2, 3, dan 4 dimensi.

Silika

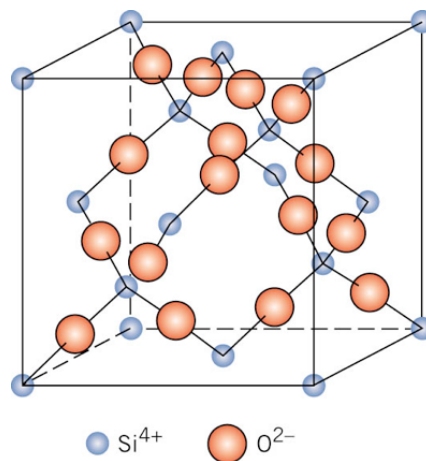
Material silikat yang paling stabil adalah silikon dioksida, atau silika (SiO_2). Jaringan tiga dimensinya terbentuk akibat setiap atom silikon yang di pojok dari setiap tetrahedron dipakai bersama dengan tetrahedron tetangganya. Dengan demikian, material menjadi netral dan struktur elektronnya menjadi stabil. Rasio Si : O adalah 1 : 2 sesuai dengan rumus kimianya.

Jika tetrahedral ini tersusun dengan teratur, terbentuklah struktur kristalin (lihat Gambar 2.10a). Struktur ini bersifat polimorfi, dengan struktur kuarsa (*quartz*), kristobalit



GAMBAR 9.10 Susunan atom pada kristal kristobalit yang merupakan polimorfi dari SiO_2 .

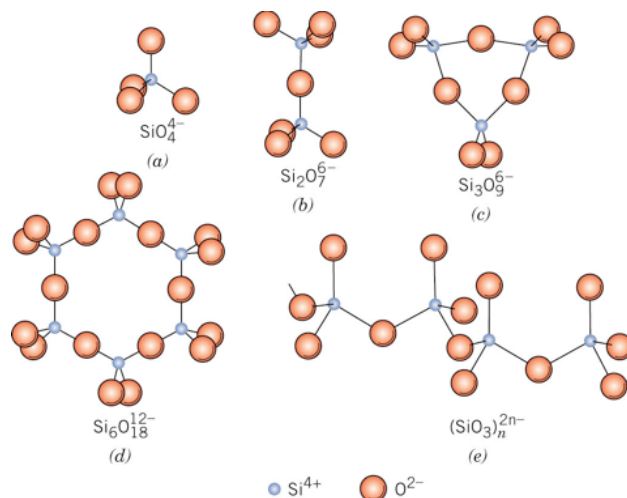
Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.



GAMBAR 9.11 Ilustrasi skematis dari posisi ion di dalam gelas Na-silika.

Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

(Gambar 9.10), dan tridimit. Strukturnya cukup kompleks dan tidak tersusun padat sehingga silika memiliki berat jenis yang rendah. Pada temperatur ruang, berat jenis silika adalah $2,65 \text{ g/cm}^3$. Kuatnya ikatan kovalen di antara Si-O tergambar dari tingginya titik lebur, yaitu 1.710°C .



GAMBAR 9.12 Lima struktur ion silikat yang terbentuk dari tetrahedral SiO_4^{4-} .

Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

Gelas Silika

Silika juga dapat berada sebagai padatan nonkristalin atau gelas yang memiliki struktur atom yang acak seperti layaknya cairan. Oleh karena itu, material ini disebut dengan *fused silica* atau *vitreous silica*. Struktur gelas silika sama dengan struktur silika, hanya susunan atomnya tidak teratur, lihat Gambar 2.10b.

Material gelas yang kita temukan sehari-hari, seperti gelas, jendela, toples, dan lain-lain, terbuat dari gelas silika yang dicampur dengan CaO dan NaO . Kedua oksida ini tidak membentuk jaringan polihedral. Namun demikian, kationnya masuk ke dalam struktur SiO_4^{4-} dan memodifikasinya. Oleh karena itu, kedua oksida sering disebut dengan pemodifikasi (*modifier*) jaringan. Struktur gelas Na-silika dapat dilihat pada Gambar 9.11.

Silikat Sederhana

Ada lima buah struktur silikat sederhana, seperti tampak pada Gambar 9.12. Struktur yang paling sederhana adalah struktur yang melibatkan tetrahedral terisolasi (Gambar 9.12a). Contohnya adalah forsterit (Mg_2SiO_4), di mana dua ion Mg^{2+} berasosiasi dengan setiap tetrahedron sedemikian hingga setiap ion Mg^{2+} memiliki enam oksigen sebagai tetangga terdekat.

Silikat Berlapis

Lembaran dua dimensi atau struktur berlapis juga dapat dihasilkan dengan memakai bersama tiga ion oksigen di dalam setiap tetrahedral; untuk itu, unit satuannya adalah $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$. Muatan negatif terjadi akibat adanya ion oksigen yang tidak terikat dan menonjol keluar dari bidang.

Muatan negatif ini akan dinetralisasi oleh lapisan kedua yang kelebihan kation, yang akan berikatan dengan ion oksigen tadi. Struktur berlapis seperti ini dimiliki oleh lempung dan mineral lainnya.

Salah satu jenis lempung yang banyak dikenal adalah kaolin, yang memiliki lapisan ganda struktur silikat. Rumus kimianya adalah $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, di mana lapisan tetrahedalnya, $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, dinetralkan dengan lapisan $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$ berikutnya. Struktur ini dapat dilihat pada Gambar 9.13, dimana sumbu vertikalnya diperbesar agar lebih jelas. Lapisan tengah anion berisi ion O^{2-} dari $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, serta ion $(\text{OH})^-$ dari $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$. Ikatan di dalam masing-masing lapisan adalah gabungan ikatan ionik dan kovalen yang sangat kuat. Sementara itu, ikatan antarlapisan hanyalah ikatan van der Waals yang lemah. Kristal kaolin terbuat dari sederet lapisan ganda yang ditumpuk saling sejajar hingga akhirnya membentuk pelat rata yang kecil dengan diameter kurang dari 1 μm dengan bentuk heksagonal, seperti tampak pada Gambar 9.14.

9.5 Karbon

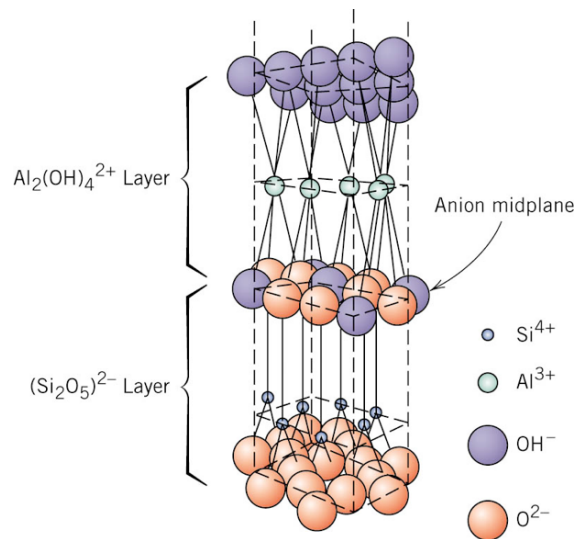
Karbon adalah unsur yang bersifat polimorfi, di mana memiliki beberapa struktur kristal maupun dapat bersifat amorf. Karbon sebenarnya tidak dapat diklasifikasikan ke dalam salah satu material tradisional, seperti logam, polimer, atau keramik. Namun demikian, di dalam buku ini, karbon dibahas sebagai bagian dari keramik karena strukturnya mirip dengan zinc blende.

Intan

Intan (*diamond*) adalah polimorfi karbon yang metastabil pada temperatur ruang dan tekanan atmosfer. Struktur kristalnya mirip dengan *zinc blende*, di mana atom karbon menempati seluruh posisi, baik posisi Zn maupun S (lihat Gambar 9.15). Jadi, setiap atom karbon terikat dengan empat atom karbon lainnya. Struktur seperti ini sering disebut sebagai kubus intan (*diamond cubic*). Proses terbentuknya intan di alam membutuhkan kondisi yang khusus, di mana kondisi dengan tekanan yang tinggi (4,5–6 MPa) dan temperatur yang tinggi (900–1.300°C). Oleh karena itu, intan lebih sering ditemukan di lapisan litosfer dan pada daerah tempat jatuhnya meteor. Untuk kepentingan komersial, intan juga dapat dibuat melalui proses laboratorium dan dikenal sebagai intan buatan.

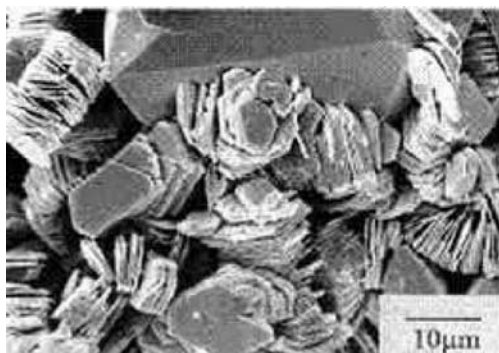
Intan diaplikasikan sebagai perhiasan dan alat potong, dengan sifat yang sangat menarik, antara lain.

1. Keras (material paling keras).
2. Konduktivitas listrik sangat rendah, karena ikatan kovalen dan struktur kristal yang kuat.
3. Konduktivitas panas tinggi.
4. Transparan terhadap cahaya tampak dan infra merah.
5. Indeks pembiasan tinggi.



GAMBAR 9.13 Struktur lempung kaolin yang terdiri dari lapisan ganda.

Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

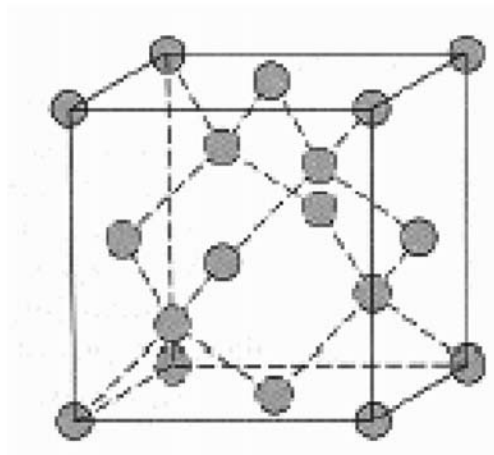


GAMBAR 9.14 Foto SEM dari kristal kaolin yang berupa pelat heksagonal yang saling menumpuk satu sama lainnya.

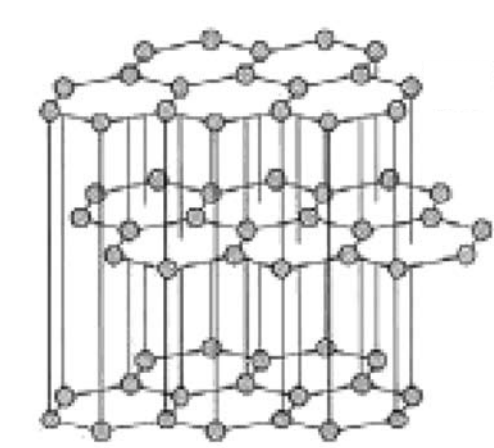
Sumber: Diadaptasi dari <http://www.smianalytical.com/clay-analysis.html>.

Grafrit

Polimorfi lain dari karbon adalah grafit, di mana struktur kristalnya lebih stabil daripada intan pada temperatur ruang. Struktur grafit terdiri atas lapisan atom karbon yang tersusun secara heksagonal. Di dalam setiap lapisannya, masing-masing atom karbon terikat dengan tiga atom karbon lainnya yang sebidang dengan ikatan kovalen (lihat Gambar 9.16). Elektron keempat berpartisipasi dalam ikatan van der Waals yang mengikat antarlapisan. Oleh karena ikatan antarlapisan yang lemah ini, grafit mudah pecah pada antarlapisan, berakibat pada kemampuan pelumasan yang baik.



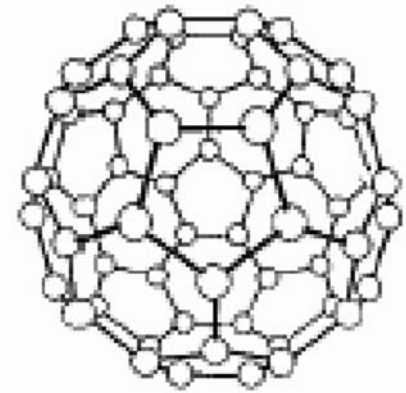
GAMBAR 9.15 Struktur karbon sebagai intan.



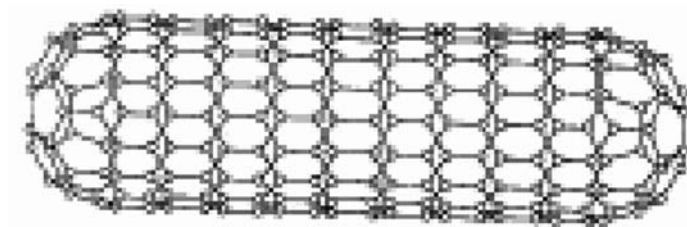
GAMBAR 9.16 Struktur karbon sebagai grafit

Grafit diaplikasikan sebagai elemen panas untuk dapur, elektroda pengelasan busur listrik, krusibel, cetakan pengecoran, refraktori, nosel roket, pemurni air, dan lain-lain. Berikut adalah sifat grafit.

1. Konduktivitas listrik pada arah lapisan (sejajar dengan lapisan heksagonal) tinggi
2. Kekuatan tinggi.
3. Stabil secara kimia pada suhu tinggi.
4. Konduktivitas listrik tinggi.
5. Termal ekspansi rendah.
6. Tahan terhadap kejutan panas (*thermal shock*).
7. Kemampuan penyerapan gas tinggi.
8. Kemampuan terhadap mesin baik.



GAMBAR 9.17 Struktur molekul karbon *buckminsterfullerene* (C₆₀).

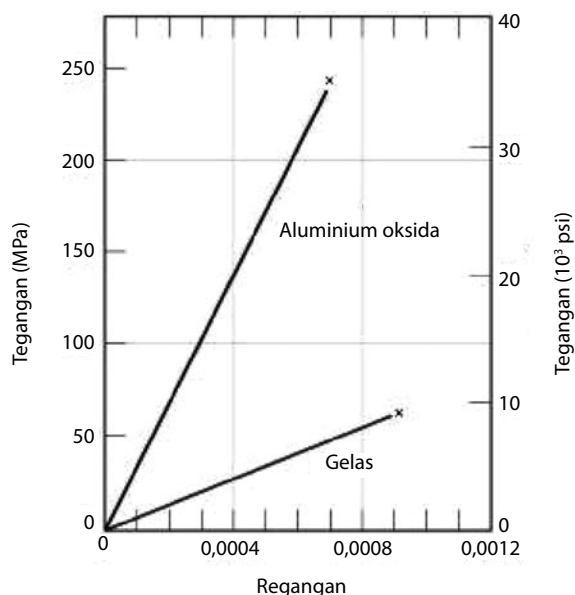


GAMBAR 9.18 Struktur *carbon nanotube*.

Fullerenes

Bentuk polimorfi karbon ini ditemukan pada tahun 1985. Molekulnya tertentu dengan bentuk berlubang yang terdiri atas 60 atom karbon, sehingga molekul tunggalnya diberi nama C₆₀. Setiap molekul terdiri dari atom karbon yang terikat satu sama lain dalam bentuk heksagon (enam atom) dan pentagon (lima atom), seperti tampak pada Gambar 9.17. Struktur seperti ini disebut *buckminsterfullerene*, sesuai dengan nama penemunya *R. Buckminster Fuller*. Istilah *fullerenes* juga kemudian dipakai untuk menyebutkan material yang tersusun dari molekul seperti bola ini. Material karbon *fullerenes* ini bersifat isolator. Akan tetapi, dengan memberikan tambahan unsur pengotor, material ini dapat menjadi sangat konduktif.

Bentuk lain dari *fullerenes* adalah *carbon nanotube*, yang berbentuk menyerupai tabung atau kapsul, seperti terlihat pada Gambar 9.18. Lebar *carbon nanotube* hanya beberapa *nanometer* saja, tetapi panjangnya dapat mencapai beberapa milimeter. Kebanyakan ujung *carbon nanotube* tertutup, namun ada pula yang terbuka. Keunikan struktur molekul *carbon nanotube* membuat sifatnya secara makro menjadi luar biasa. Kekuatan tarik, konduktivitas listrik, keuletan, ketahanan panas, dan kestabilan kimia yang tinggi merupakan keunggulan-keunggulan *carbon nanotube*. Salah satu pemakaian yang paling sering dari *carbon nanotube* adalah pemakaian untuk baterai kertas. Baterai kertas merupakan



GAMBAR 9.19 Kurva hasil pengujian keramik Al_2O_3 (kristalin) dan gelas (amorf).

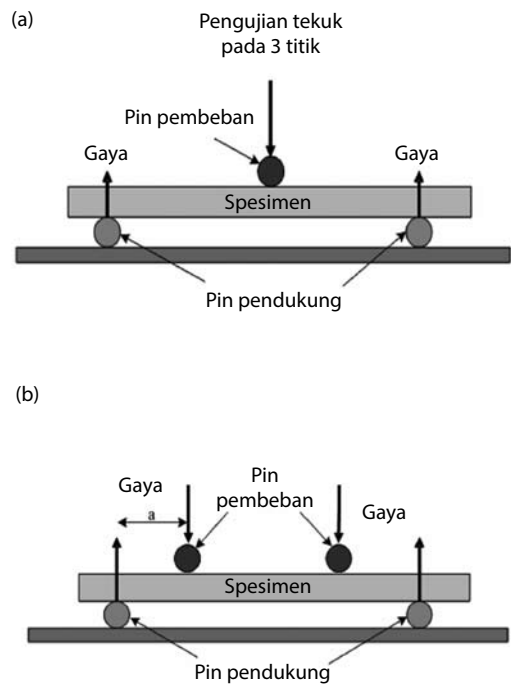
Sumber: Diadaptasi dari William D. Callister, Jr., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 6th ed. (John Wiley & Sons, Inc., 2004), Figure 12.30.

suatu media penyimpan energi yang tipis dan sebagai superkapasitor. *Carbon nanotube* juga dikembangkan untuk komponen-komponen kendaraan luar angkasa.

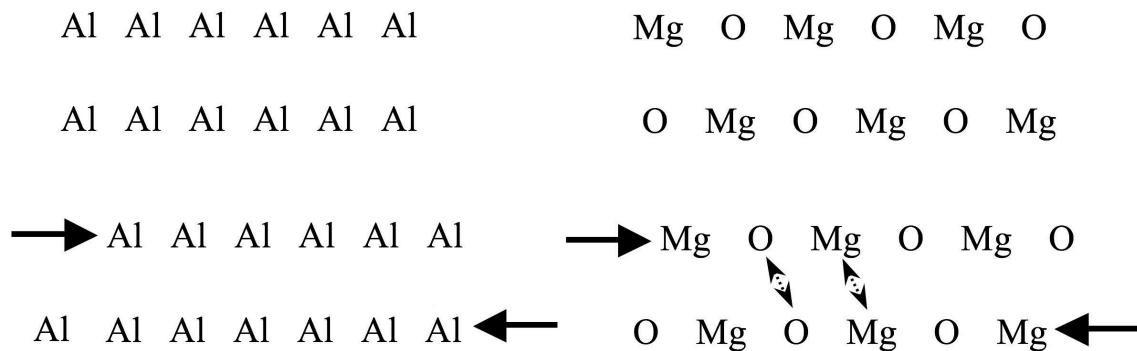
9.6 Sifat Mekanik Keramik

Keramik umumnya mempunyai kekerasan yang tinggi, di sisi lain keramik juga memiliki ketangguhan yang rendah sehingga sangat rentan terhadap beban impact. Namun demikian, tidak semua keramik keras. Terdapat pengecualian untuk talk, lempung, dan mika yang memiliki kekerasan rendah. Material keramik keras karena fase keramik tidak dapat mengalami deformasi plastik seperti yang diperlihatkan pada kurva tegangan-regangan pada Gambar 9.19. Hasilnya, keramik dapat digunakan sebagai material abrasif, seperti intan, Al_2O_3 , TiC , dan SiC . Material TiC dan SiC merupakan material penting dalam pembuatan kertas ampelas dan alat potong.

Keramik merupakan material getas dan paling kaku di antara material lainnya. Kebanyakan material ini lebih kaku dari semua logam karena tidak dapat mengalami deformasi plastik. Keramik hampir tidak memiliki keuletan sama sekali. Ketiadaan keuletan pada keramik membuatnya sangat rentan terhadap beban impact, meskipun ketahanan impact juga ditentukan oleh bentuk benda kerjanya. Benda kerja dengan bagian sudut yang tajam dan tipis akan lebih lemah terhadap beban impact. Kekuatan untuk material getas, seperti keramik, jarang sekali diukur melalui metode pengujian tarik, tetapi lebih dipilih pengujian tekuk atau kelenturan. Pengujian kelenturan dapat dilakukan dengan tiga atau empat titik. Gambar 9.20 menunjukkan ilustrasi dari pengujian tekuk tiga atau empat titik pada keramik. Hasil dari pengujian tekuk ini adalah beban dan defleksi.



GAMBAR 9.20 Ilustrasi skematis pengujian tekuk pada keramik, (a) tiga titik dan (b) empat titik.
Sumber: Diadaptasi dari www.substech.com.



GAMBAR 9.21 Perbandingan skematis proses luncuran (a) logam atom tunggal dan (b) keramik atom ganda. Tegangan yang besar dibutuhkan untuk menggeser atom pada MgO, karena besarnya tegangan tolak-menolak antar-ion sejenis.

Pada logam, deformasi sering kali terjadi karena luncuran di antara bidang-bidang kristal yang bersebelahan. Ketahanan terhadap tegangan geser pada logam umumnya lebih rendah dari ketahanan terhadap tegangan tariknya. Perbedaan antara luncuran yang terjadi pada logam

murni dan luncuran yang terjadi pada keramik ditunjukkan secara skematis pada Gambar 9.21. Susunan atom pada logam murni tetap sama setelah terjadi luncuran satu tahap. Pada keramik, luncuran satu tahap yang terjadi akan menciptakan susunan atom baru dengan tegangan ikat antar-atom yang berbeda. Susunan yang baru ini dapat terbentuk hanya dengan tegangan yang kuat untuk memutuskan ikatan ion antara Mg^{2+} dan O^{2-} . Selain itu, tegangan yang diperlukan untuk terjadinya luncuran pertama dan tahap kedua harus mampu melampaui tegangan tolak-menolak yang terjadi antara ion negatif-negatif dan ion positif-positif. Mekanisme tersebut menghindarkan keramik untuk mengalami luncuran seperti yang umumnya terjadi pada logam. Ketiadaan luncuran pada keramik menyebabkan beberapa hal, antara lain.

1. Keramik tidak ulet.
2. Kekuatan tekan dapat sangat tinggi jika tidak ada porositas.
3. Kekuatan tarik secara teoretis dapat menjadi tinggi.

Pada kenyataannya, kekuatan tarik keramik umumnya tidak terlalu tinggi. Ketidaksempurnaan (yang terdapat) pada keramik dapat menimbulkan konsentrasi tegangan pada material tersebut. Ketidaksempurnaan ini dapat berupa retak, porositas, batas butir, dan mungkin desain bentuk material itu sendiri. Pada logam yang ulet, konsentrasi-konsentrasi tegangan yang terdapat di dalamnya dapat dihilangkan melalui anil pelepasan tegangan. Namun demikian, pada material yang getas seperti keramik, hal tersebut mustahil untuk dilakukan.

Dalam skala atom, peristiwa patah atau gagalnya suatu material padat karena tegangan tarik sesungguhnya merupakan pemutusan ikatan-ikatan atom dan ion pada material tersebut sehingga terbentuk dua permukaan baru. Apabila terdapat suatu tegangan tarik yang bekerja pada bahan, maka bahan tersebut akan mengalami deformasi elastis dan energinya disimpan sebagai energi elastis. Ketika terdapat cacat pada bahan, cacat (ini) akan menjalar dan membentuk permukaan baru, sedangkan energi elastis tadi akan dibebaskan. Penjalaran retakan ditentukan melalui hubungan antara jumlah energi yang dibebaskan, energi permukaan yang baru terbentuk, dan oleh panjang retakan. Teori tersebut dijelaskan oleh Griffith melalui rumus, sebagai berikut.

$$\frac{\partial F}{\partial C} = \frac{\partial (F_E + F_s)}{\partial C} = -\frac{2\pi C \sigma^2}{E} + 4\gamma \leq 0 \quad (9.1)$$

di mana F_E adalah jumlah energi yang dibebaskan, F_s adalah energi permukaan yang baru terbentuk, dan C adalah panjang retakan. Jika terjadi ketidaksamaan dalam persamaan ini, patahan akan terjadi. Apabila C pada $(\partial F / \partial C) = 0$ adalah C_m dan panjang retakan mula-mula adalah C_0 , maka retakan tidak tumbuh jika $C_0 < C_m$. Dan, keadaan kritis terjadi jika $C_0 = C_m$.

Menurut teori ini, kekuatan material akan berkurang jika terdapat cacat atau retakan pada material tersebut. Kekuatan patah material yang memiliki retakan akan lebih kecil dari kekuatan asli bahan tersebut. Jika terdapat suatu retakan pada material, persamaan berikut akan berlaku

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (9.2)$$

K_{IC} adalah ketangguhan patah regangan bidang (plane strain fracture toughness), Y adalah konstanta tanpa satuan yang bergantung pada material dan ukuran retak, σ adalah tegangan yang diberikan, dan α adalah panjang dari retak permukaan atau setengah panjang retak dalam. Retak tidak akan menjalar selama $Y\sigma\sqrt{\pi\alpha}$ lebih kecil dari K_{IC} . Nilai K_{IC} diperoleh dengan mengukur panjang retakan tiruan yang dibuat pada material tertentu. Dalam suatu perencanaan yang membutuhkan material, nilai K_{IC} perlu diketahui. Tabel 9.3 memberikan nilai K_{IC} dari beberapa material.

Dari penjelasan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa secara teoretis, keramik sangat tahan terhadap beban tarik atau beban tekan. Akan tetapi, oleh karena terdapatnya cacat pada keramik, seperti porositas, material keramik menjadi tidak tahan terhadap beban tarik. Ketahanan material keramik umumnya buruk terhadap tegangan geser pada ujung retakan. Dengan demikian, keramik memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih rendah dari kekuatan tekannya. Kekuatan tekan keramik dapat mencapai 5 hingga 10 kali kekuatan tariknya.

TABEL 9.3 Nilai K_{IC} beberapa material.

Material	Ketangguhan Patah K_{IC}
Baja 4340	99 MPa m ^{1/2}
Aluminium 2024	26 MPa m ^{1/2}
Ti-6Al-4V	55 MPa m ^{1/2}
Al ₂ O ₃	1,7 MPa m ^{1/2}
Si ₃ N ₄	5 MPa m ^{1/2}

9.7 Sifat Kelistrikan Keramik

Material yang tidak memiliki elektron bebas tidak memiliki konduktivitas listrik yang tinggi (misal: logam) sehingga material keramik memiliki konduktivitas listrik yang sangat rendah. Material keramik dengan ikatan ioniknya dapat memiliki sedikit konduktivitas ionik, tetapi hal ini membutuhkan difusi ion dan biasanya hanya terjadi dalam tingkatan yang rendah. Oleh karena itu, gelas menjadi isolator komersial pada aplikasi elektronik.

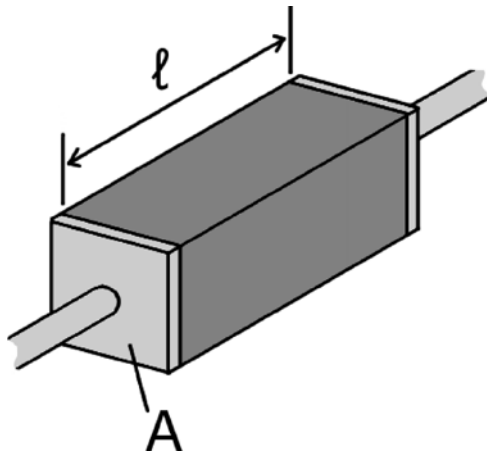
Keramik juga tergolong sebagai material dielektrik (yaitu material yang memiliki konduktivitas listrik sangat rendah, tetapi dapat menyimpan medan elektrostatik). Konduktivitas listrik keramik berbeda-beda bergantung pada medan listrik dan temperatur yang diberikan. Hal ini disebabkan mekanisme transfer muatan yang bergantung pada frekuensi. Lebih jauh, energi aktivasi yang dibutuhkan untuk migrasi muatan dapat dicapai melalui energi kalor, sehingga muatan yang tak bergerak dapat menjadi bergerak.

Faktor yang penting pada keramik adalah konstanta dielektrik. Konstanta dielektrik, atau permitivitas listrik relatif, adalah sebuah konstanta dalam ilmu fisika. Konstanta ini melambangkan

rapatnya fluks elektrostatis dalam suatu bahan jika diberikan potensial listrik. Konstanta dielektrik merupakan perbandingan energi listrik yang tersimpan pada bahan tersebut, jika diberikan sebuah potensial listrik, relatif terhadap keadaan vakum (ruang hampa). Konstanta dielektrik yang dimiliki oleh keramik dimanfaatkan untuk membuat kapasitor, insulator, dan resistor.

Meskipun demikian, sebagian besar keramik memiliki konduktivitas listrik yang sangat kecil, walaupun ada juga keramik yang memiliki sifat superkonduktif (tahanan listriknya mendekati nol). Lantanum-barium-tembaga oksida adalah keramik yang memiliki sifat superkonduktif pada temperatur sebesar -135°C . Temperatur tersebut lebih tinggi dari temperatur superkonduktif superkonduktor lainnya (-243°C) dan juga lebih tinggi dari titik lebur nitrogen ($-195,6^{\circ}\text{C}$).

Ketika keramik digunakan sebagai isolator listrik, sangat penting bagi seorang ahli teknik untuk memperhatikan seberapa baguskah keramik tersebut bertindak sebagai isolator. Tahanan volume adalah suatu ukuran dari besarnya hambatan pada material yang sudah diketahui volumenya. Besarnya tahanan volume diukur dengan melewati suatu tegangan pada sebuah material yang sudah diketahui volumenya. Hal tersebut diilustrasikan pada Gambar 9.22.



GAMBAR 9.22 Pengukuran tahanan volume dari suatu material. Besarnya tahanan volume bergantung pada panjang dan luas permukaan material tersebut.

Besarnya tahanan volume adalah sama dengan luas area material dibagi dengan ketebalan dan dikalikan dengan hambatan, sesuai dengan rumus berikut.

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (8.3)$$

di mana: ρ adalah tahanan volume (dinyatakan dalam ohm-metres, $\Omega \text{ m}$); R adalah tahanan listrik dari material uji yang seragam (dinyatakan dalam ohm, Ω); l adalah panjang material uji (diukur dalam meter, m); dan A adalah luas penampang dari material uji (dinyatakan dalam meter², m²).

Tidak seperti logam, tahanan volume keramik berkurang seiring dengan temperatur yang meningkat. Hal ini terjadi karena ion-lah yang menjadi konduktor yang bergerak di dalam keramik, bukan elektron. Anion dan kation tentu saja lebih besar dari elektron, sehingga membutuhkan energi untuk menggerakkannya, yaitu panas. Oleh karena itu, untuk menjadi isolator yang baik, keramik harus memiliki tahanan volume yang tinggi pada temperatur aplikasinya.

9.8 Sifat Kemagnetan Keramik

Sebagian keramik memiliki sifat magnetis yang baik. Terdapat dua jenis keramik magnetis, yaitu keramik magnetis lunak dan keramik magnetis keras. Perbedaannya adalah sifat kemagnetan pada keramik magnetis lunak dapat hilang ketika medan magnet dihilangkan, sedangkan keramik magnetis keras tidak. Keramik magnetis lunak dipakai untuk menggantikan besi pada alat-alat yang membutuhkan magnetisasi dan demagnetisasi secara cepat. Keramik magnetis lunak juga sering disebut dengan sebutan ferit. Keramik ini biasanya terbuat dari oksida $M^{2+}O \cdot Fe_2^{3+}O_3$, di mana M^{2+} adalah ion logam, seperti Fe^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , dan Mg^{2+} . Keramik yang tidak memiliki M^{2+} akan bersifat diamagnetis, dan tidak dapat dimagnetisasi. Sifat yang penting pada keramik magnetis lunak adalah permeabilitas dan *hysteresis loss*. Permeabilitas sangat penting karena menyangkut kemudahan untuk magnetisasi. Di sisi lain, makna *hysteresis loss* lebih pada energi yang hilang dalam proses magnetisasi. Hal tersebut penting karena material dengan histeresis yang besar dapat menjadi terlalu panas dalam pemakaiannya.

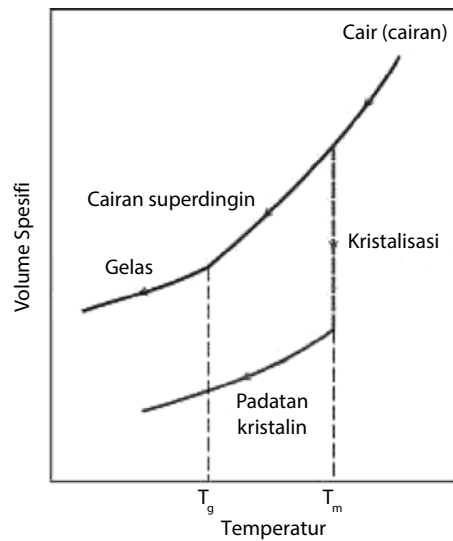
Keramik magnetis lunak menggabungkan dua sifat, yaitu sifat magnet yang baik dan konduktivitas listrik yang rendah. Konduktivitas listrik yang rendah dapat mengurangi kehilangan energi akibat adanya *eddy-current* yang terjadi jika material diaplikasikan pada medan magnet yang tinggi. Oleh karena itu, aplikasi keramik magnetis lunak lebih banyak pada aplikasi dengan frekuensi yang tinggi, seperti antena, penguat suara, *Magnetic Resonance Imaging* (MRI), dan alat perekam audio visual.

9.9 Fabrikasi dan Pemrosesan Keramik

Secara umum, proses fabrikasi keramik dapat dibagi menjadi dua, sebagai berikut.

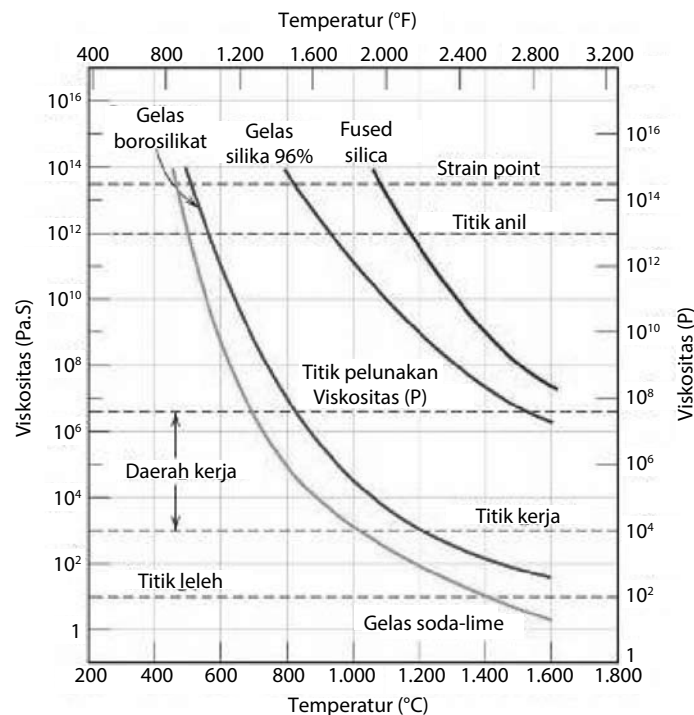
1. Pembentukan gelas
2. Pembentukan lempung

Masing-masing akan dibahas dalam bagian selanjutnya.



GAMBAR9.23 Perbandingan perubahan volume spesifik terhadap temperatur antara material kristalin dan non-kristalin. Material kristalin membeku pada titik lebur, T_m , dan material non-kristalin memiliki temperatur transisi gelas, T_g .

Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.



GAMBAR 9.24 Logaritma viskositas vs temperatur untuk *fused silica* dan tiga gelas silika lainnya.

Sumber: William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

Pembentukan Gelas

Sifat Gelas

Sebelum membahas proses pembentukan gelas, sifat gelas yang sensitif terhadap temperatur akan dibahas terlebih dahulu. Gelas, material non-kristalin, tidak membeku dengan cara yang sama dengan material kristalin. Pada saat pendinginan, gelas menjadi semakin kental secara terus-menerus dengan menurunnya temperatur. Jadi, tidak ada temperatur tertentu, di mana material gelas berubah wujud dari wujud cair menjadi padat atau sebaliknya. Salah satu perbedaan antara material kristalin dan non-kristalin terletak pada ketergantungan volume spesifik (volume per unit massa) terhadap temperatur, lihat Gambar 9.23. Pada material kristalin, penurunan volume diskontinu pada titik lebur, T_m . Sementara itu, pada material non-kristalin, penurunan volume berlangsung kontinu. Terjadi penurunan kemiringan kurva, yang disebut sebagai temperatur transisi gelas, T_g , di mana di bawah suhu tersebut, material disebut gelas, dan di atasnya, material mula-mula menjadi cairan superdingin (*supercooled liquid*) dan akhirnya menjadi cair.

Dalam pemrosesan gelas, karakteristik viskositas vs temperatur juga penting diketahui. Gambar 9.24 merupakan pengeplotan logaritma viskositas terhadap temperatur untuk *fused silica*, gelas 96% silika, borosilikat (*pyrex*), dan gelas soda-lime. Pada sumbu viskositas, titik-titik penting ditunjukkan dalam proses fabrikasi gelas, antara lain sebagai berikut.

1. Titik lebur, adalah temperatur di mana viskositas mencapai 10 Pa.s, yaitu kondisi di mana gelas cukup cair untuk disebut cairan.
2. Daerah kerja (*working range*), adalah temperatur di mana viskositas adalah 103 Pa.s, yaitu kondisi di mana gelas mudah untuk dibentuk.
3. Titik pelunakan (*softening point*), adalah (kisaran) temperatur di mana viskositas mencapai 4×10^6 Pa.s, yaitu temperatur maksimum di mana produk gelas dapat dipegang tanpa mengalami perubahan dimensi.
4. Titik anil (*annealing point*), adalah temperatur di mana viskositas mencapai 10^{12} Pa.s. Pada temperatur ini, difusi atom terjadi cukup cepat sehingga tegangan sisa dapat dihilangkan dalam waktu 15 menit.
5. *Strain point*, adalah temperatur di mana viskositas mencapai 3×10^{13} Pa.s. Di bawah *strain point*, patah akan terjadi sebelum deformasi plastis. Temperatur transisi gelas ada di atas *strain point*.

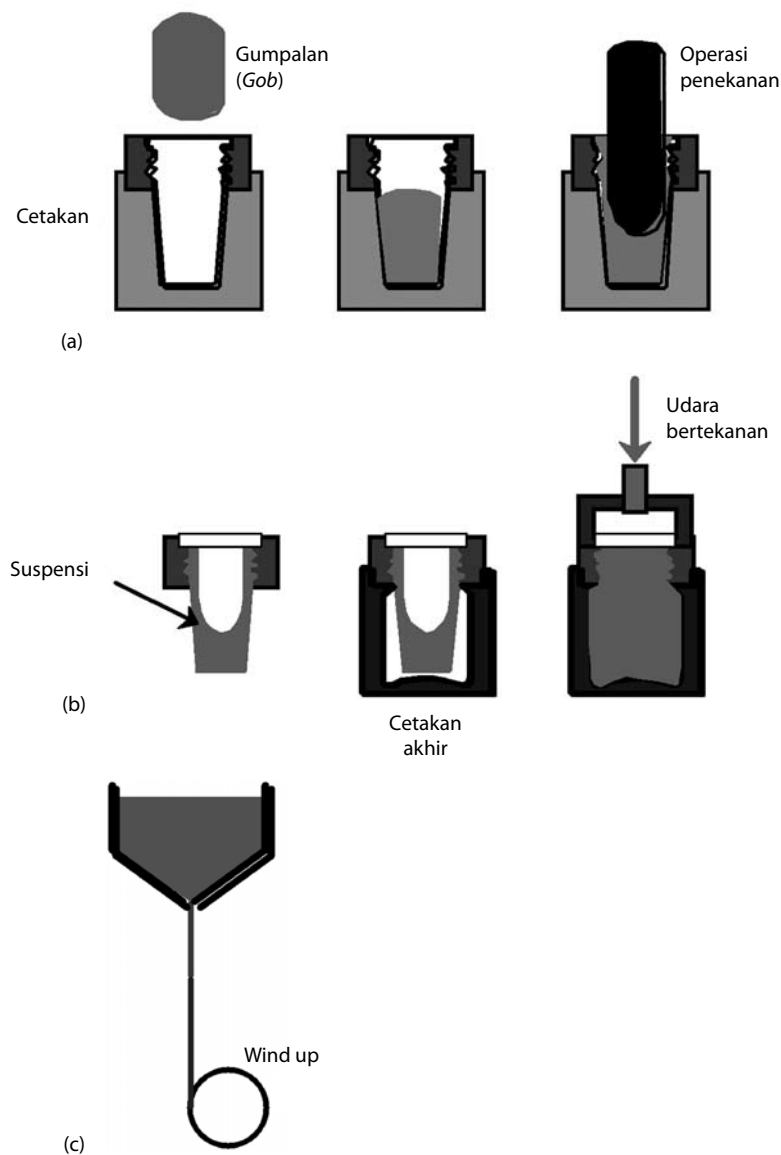
Sebagian besar pemrosesan gelas dilakukan pada daerah kerja. Tentu saja, temperatur untuk masing-masing titik tersebut bergantung pada komposisi gelas. Sebagai contoh, untuk gelas *soda-lime*, proses pembentukan dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah.

Pembentukan Gelas

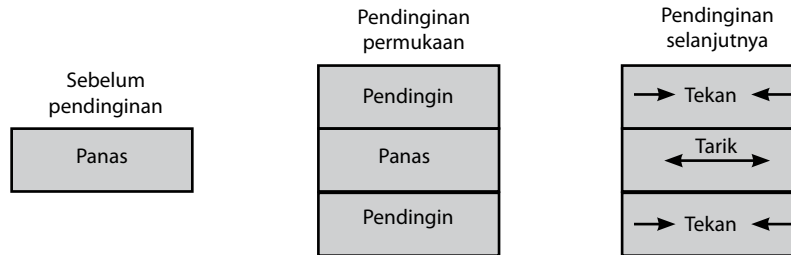
Ada tiga macam proses pembentukan gelas, yaitu: *pressing*, *blowing*, dan *fiber forming*, yang secara ilustratif digambarkan pada Gambar 9.25.

Setelah pembentukannya, produk gelas umumnya dilaku panas melalui proses anil atau proses temper (*glass tempering*). Anil dilakukan untuk menghilangkan tegangan sisa akibat

pendinginan yang tidak seragam. Dalam hal ini, gelas dipanaskan hingga mencapai titik anil dan kemudian didinginkan secara perlahan. Sementara itu, temper pada dasarnya adalah memberikan tegangan tekan pada permukaan gelas, sehingga pertumbuhan retak pada permukaan gelas dapat dihambat. Tahapannya dapat dilihat pada Gambar 9.26. Gelas temper (atau dikenal sebagai *tempered glass—ed.*) digunakan untuk kaca mobil, lensaacamata, pintu kaca besar, dan lain-lain.



GAMBAR 9.25 Proses pembentukan gelas (a) pressing, (b) blowing, dan (c) fiber forming.



GAMBAR 9.26 Tahapan proses gelas temper.



GAMBAR 9.27 Tahapan pemrosesan keramik dari lempung.

Pembentukan Lempung

Proses pembentukan lempung dan keramik putih melewati beberapa tahap yang digambarkan pada Gambar 9.27, di mana setelah dibentuk, komponen atau barang keramik harus melalui tahap pengeringan dan pembakaran. Terjadi perubahan pada masing-masing komponen selama kedua tahap pemrosesan tersebut. Ada dua macam proses pembentukan lempung sebelum dikeringkan, yaitu pembentukan hidroplastis dan *slip casting*, yang akan dibahas pada bagian selanjutnya.

Pembentukan Hidroplastis

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, struktur kristal lempung (kaolin) adalah struktur berlapis, di mana ikatan antarlapisannya adalah ikatan van der Waals yang lemah. Pada proses pembentukan hidroplastis, lempung dicampur dengan air dan kemudian dibentuk. Molekul air yang ditambahkan ke dalam lempung akan masuk ke dalam

ruang antarlapisan sehingga memudahkan lempung untuk digeser pada posisi ikatan van der Waals. Hal ini menyebabkan lempung menjadi sangat fleksibel dan dapat dibentuk tanpa retak. Pembentukan hidroplastis yang paling banyak dilakukan adalah ekstrusi, di mana lempung tadi didorong ke dalam sebuah cetakan sehingga berubah bentuk sesuai dengan cetakan tersebut. Selain itu, pembentukan hidroplastis merupakan proses manual yang paling banyak dipakai, seperti tampak pada Gambar 9.28.



GAMBAR 9.28 Proses pembentukan hidroplastis keramik.

Slip Casting

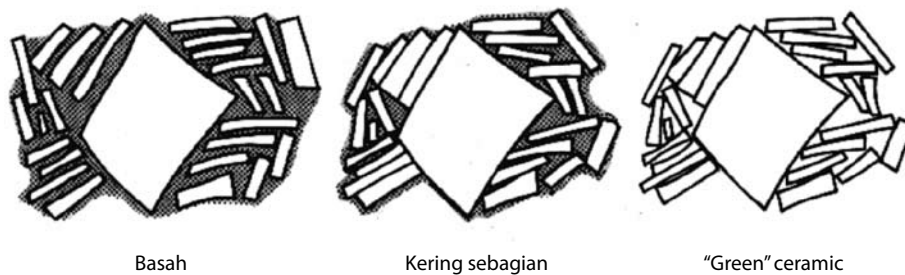
Proses lain untuk lempung adalah *slip casting*. *Slip* adalah suspensi lempung dan/atau material plastis lainnya dalam air. Ketika dituang ke dalam cetakan berpori, air dalam *slip* akan diserap oleh cetakan dan keramik akan membeku sesuai dengan bentuk cetakan. Proses ini disebut pengecoran padat (*solid casting*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.29a. Proses juga dapat dihentikan ketika dinding cetakan telah mencapai ketebalan tertentu, dan cetakan dibalik, sehingga suspensi yang masih tersisa akan terbuang dan terbentuk produk yang berlubang (lihat Gambar 9.29b). Proses ini disebut *drain casting*.



GAMBAR 9.29 Proses slip casting pada keramik (a)*solid casting* , (b)*drain casting*.

Pengeringan

Keramik yang dihasilkan dari proses hidroplastis atau *slip casting* memiliki porositas yang besar dan kekuatan yang rendah, serta masih mengandung air. Air akan menguap selama proses penguapan sehingga terjadi pengerutan. Pada tahap awal pengeringan, partikel lempung dikelilingi dan dipisahkan satu sama lainnya oleh lapisan air yang tipis (lihat Gambar 9.30). Ketika pengeringan berlanjut, lapisan air hilang sehingga jarak antartpartikel mengecil, yang terlihat sebagai pengerutan. Selama pengeringan, penting untuk mengontrol laju pengeluaran air ke permukaan melalui proses difusi dan laju penguapan. Apabila laju penguapan terlalu cepat jika dibandingkan dengan laju difusi, maka permukaan akan lebih cepat mengering daripada bagian dalam, sehingga akan terjadi retak. Laju penguapan dapat dikontrol dengan mengatur kelembapan dan kecepatan aliran udara.



GAMBAR 9.30 Beberapa tahap pelepasan air dari partikel lempung selama proses pengeringan.

Pembakaran (*firing*)

Keramik yang sudah dikeringkan, tetapi belum dibakar disebut bakalan *green*. Proses pembakaran biasanya dilakukan pada kisaran temperatur 900–1.400°C, bergantung pada komposisi dan kekuatan akhir yang diinginkan. Selama pembakaran, porositas akan mengecil dan kekuatan meningkat.

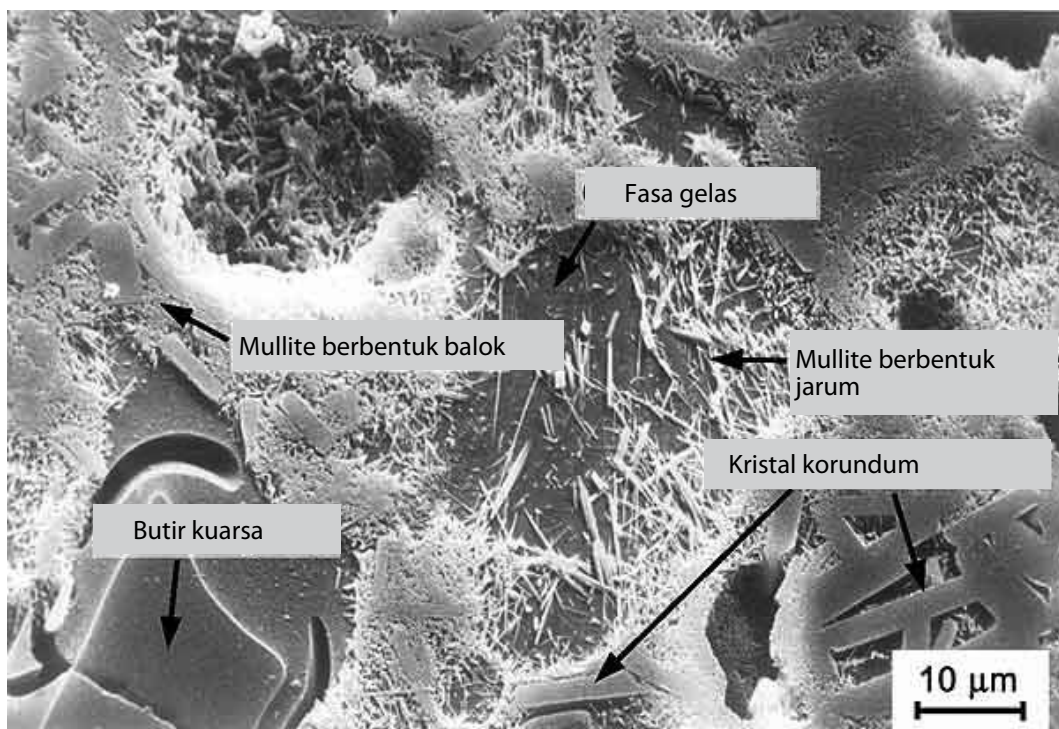
Ketika lempung dibakar, reaksi kompleks yang disebut dengan vitrifikasi reaksi. Vitrifikasi adalah pembentukan cairan secara perlahan-lahan yang mengalir dan mengisi pori. Derajat vitrifikasi bergantung pada temperatur, waktu pembakaran, dan komposisi keramik. Temperatur di mana terjadi pembentukan cairan dapat diturunkan dengan menambahkan fluks, seperti *feldspar*. Pada saat pendinginan, fasa cair ini akan membentuk matriks gelas sehingga menghasilkan struktur yang padat dan kuat. Dengan demikian, struktur akhir akan terdiri atas fase tervitrifikasi, partikel kuarsa yang tidak bereaksi, dan porositas, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 9.31.

Penekanan Serbuk

Proses ini berlaku untuk serbuk keramik, baik lempung maupun non-lempung. Proses penekanan serbuk keramik analog dengan proses metalurgi serbuk, di mana tahapannya adalah pencampuran, penekanan, dan pemanasan (sintering). Pemanasan mendorong terjadinya difusi,

sehingga terbentuk jembatan antarpartikel. Pencampuran material dan penekanan dapat dilakukan melalui beberapa metode, seperti ekstrusi, *injection molding*, *pressing*, *slip casting*, dan *tape forming*. Hasil proses tersebut adalah bakalan yang diharapkan tidak memiliki retak dan rongga yang signifikan.

Bakalan bukan merupakan produk akhir. Proses pemadatan bakalan dinamakan sintering. Pemadatan terjadi akibat pemberian energi panas yang terkontrol sehingga menghasilkan ikatan antarpartikel yang hanya mengandung sedikit rongga. Selama proses sintering berlangsung, ikatan antarpartikel semakin berkembang dan porositas menjadi menurun. Jumlah porositas yang rendah sangat diinginkan untuk mendapatkan sifat mekanik yang tinggi. Proses sintering dapat dilakukan melalui beberapa mekanisme, yaitu fasa uap, fasa padat, fasa cair, dan fasa cair reaktif. Sintering fasa cair merupakan metode yang sering dilakukan. Dalam proses ini, fasa eutektik yang titik leburnya rendah terbentuk dan membantu dalam proses pemadatan dengan cara mengisi rongga yang ada dan menimbulkan sejumlah mekanisme transfer massa, seperti pelarutan, transfer fasa uap, dan pengendapan.

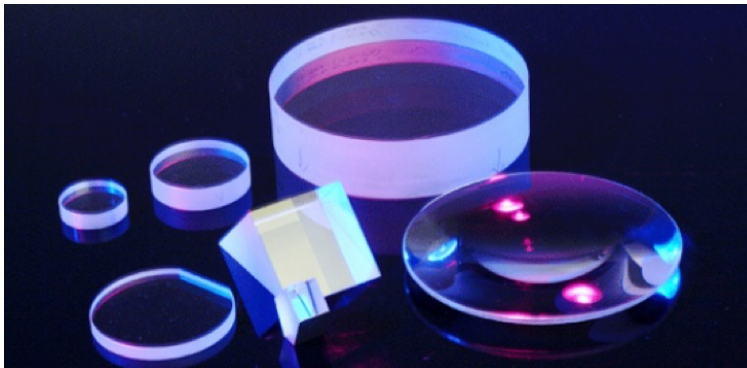


GAMBAR 9.31 Struktur mikro (SEM) spesimen porselen yang sudah dibakar, terdiri atas butir kuarsa, kristal korundum, mullite berbentuk jarum dan balok, serta fase gelas dan pori.

Sumber: Diadaptasi dari <http://www.keramverband.de/pic/ebild3.jpg>.

Latihan

1. Untuk senyawa keramik, apakah karakteristik utama dari ion penyusun yang akan menentukan struktur kristalnya?
2. Tunjukkan bahwa rasio radius kation terhadap anion untuk bilangan koordinasi 4 adalah 0,22
3. Jelaskan (a) mengapa kekuatan patah keramik sering kali bervariasi nilainya untuk jenis keramik yang sama, dan (b) mengapa kekuatan patah keramik meningkat dengan menurunnya ukuran spesimen?
4. Jelaskan dua karakteristik utama dari gelas.
5. (a) Apa yang dimaksud dengan devitrifikasi?
(b) Jelaskan dua sifat yang dapat ditingkatkan dan dua sifat yang menurun akibat terjadinya devitrifikasi.
6. Apa perbedaan temperatur transisi gelas dan titik lebur?
7. (a) Mengapa laju pengeringan keramik hasil proses pembentukan hidroplastis dan *slip casting* perlu dikontrol?
(b) Sebutkan tiga faktor yang memengaruhi laju pengeringan.
8. Gambar ini adalah macam-macam lensa dan prisma terbuat dari CaF_2



- (a) Gambarkan struktur kristal CaF_2 . (5 marks).
- (b) Hitung bilangan koordinasi CaF_2 , bila radius ionik Ca^{2+} dan F^- masing-masing adalah 0,100 nm and 0,133 nm.
- (c) Bagaimana CaF_2 menyeimbangkan muatan ionik dengan bilangan koordinasi? Jelaskan.

SIFAT, APLIKASI, DAN PEMROSESAN KOMPOSIT

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, Anda diharapkan mampu:

1. Memahami dan membedakan jenis-jenis material komposit.
2. Memahami jenis-jenis serat yang dipakai dalam komposit berpenguat serat.
3. Memahami beberapa komposit struktural dan aplikasinya.

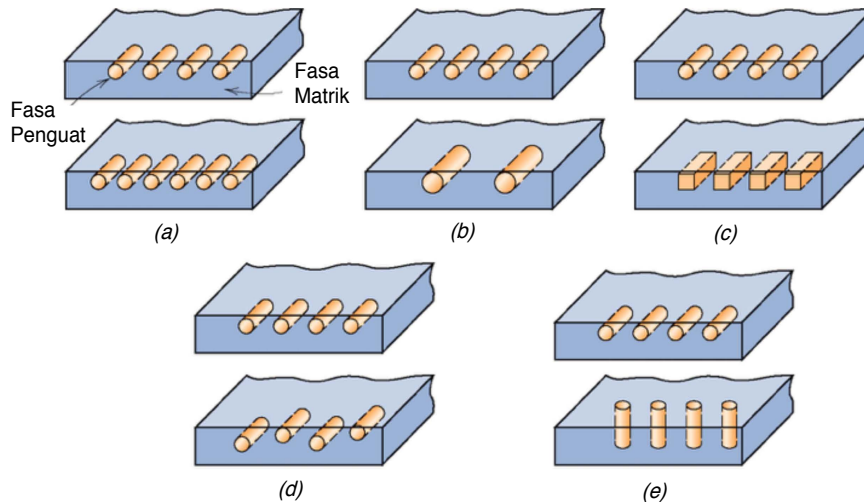
10.1 Pendahuluan

Teknologi modern membutuhkan material dengan sifat khusus yang merupakan kombinasi, yang tidak dapat dipenuhi oleh material konvensional seperti logam, polimer atau keramik. Oleh karena itu, dikembangkanlah material komposit, yang secara umum didefinisikan sebagai sebuah material yang terdiri dari beberapa material, dimana sifat yang dimilikinya merupakan gabungan sinergis dari sifat material penyusunnya. Komposit mulai dikembangkan sejak pertengahan abad ke-20 dengan dibuatnya material komposit polimer berpenguat serat gelas.

Bila dilihat dari definisinya, baja feritik (mengandung 0,8 % C) juga dapat dianggap sebagai komposit, karena terdiri dari lapisan ferit yang lunak dan ulet dan lapisan sementit yang keras dan sangat getas. Kombinasi sifat mekanik baja perlitik ini menghasilkan baja yang relatif superior dengan keuletan dan kekuatan yang tinggi. Beberapa komposit juga ditemukan di alam. Sebagai contoh adalah kayu yang terdiri dari serat selulosa yang kuat dan fleksibel, yang dibungkus dengan material lignin yang kaku. Tulang juga merupakan komposit alami, yang terdiri dari kolagen protein yang kuat namun lunak, serta mineral apatit yang keras dan getas. Namun, komposit yang dikembangkan saat ini, bukanlah komposit seperti baja feritik, kayu atau tulang. Komposit yang dimaksud disini adalah komposit yang merupakan material dengan multi fasa yang dibuat secara sintesis, bukan material alami. Material penyusun komposit haruslah dapat dibedakan secara kimiawi dan makroskopik dan dipisahkan oleh permukaan yang jelas.

Sebagian besar komposit terdiri dari dua fasa, yang pertama disebut matriks, yang merupakan fasa yang kontinu dan mengelilingi fasa lainnya, yang disebut sebagai penguat.

Sifat dari komposit merupakan fungsi dari sifat material penyusunnya, jumlahnya serta bentuk geometri dari fasa penguat. Geometri fasa kedua dalam hal ini adalah: bentuk partikel, ukuran partikel, distribusi partikel dan orientasi partikel, seperti tampak pada Gambar 10.1.



Gambar 10.1. Berbagai susunan geometri dan spasial fasa penguat yang mempengaruhi sifat komposit
(a) konsentrasi, (b) ukuran, (c) bentuk, (d) distribusi, dan (e) orientasi

Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction 8th Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

Bila komposit memiliki fasa penguat yang geometri dan sifatnya sama kesemua arah (isotropik), maka fraksi volume dan sifat dari masing-masing fasa akan menentukan sifat komposit secara keseluruhan. Persamaan matematis yang diformulasikan untuk memprediksi sifat komposit dikenal sebagai **Hukum Pencampuran**, yaitu:

$$E_k = E_m V_m + E_p V_p \quad (10.1)$$

Dimana E adalah modulus elastisitas, V adalah fraksi volume, sementara subskrip k, m dan p masing-masing menandakan komposit, matriks dan penguat. Dalam hal ini, E (modulus elastisitas) dapat digantikan dengan sifat lainnya, seperti densitas, kekerasan, kekuatan, dan sifat lainnya.

Berdasarkan morfologi material penguatnya, komposit dapat dibagi menjadi tiga, yaitu: (i) **komposit partikulat**, (b) **komposit serat**, dan (c) **komposit laminat**. Sementara berdasarkan jenis material matriksnya, komposit dapat dibagi menjadi tiga, yaitu: (a) **komposit bermatriks polimer (polymer matrix composites)**, (b) **komposit bermatriks logam (metal matrix composites)**, dan (c) **komposit bermatrix keramik (ceramic matrix composites)**. Pada buku ini, pembahasan komposit akan dilakukan berdasarkan klasifikasi yang terakhir.

TABEL 10.1 Sifat dari beberapa jenis serat penguat.

Material	Gravitasi Spesifik	Kekuatan Tarik (GPa)	Kekuatan Spesifik (GPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	Modulus Spesifik (GPa)
Whiskers					
Grafit	2,2	20	9,1	700	318
Silikon Nitrida	3,2	5–7	1,56–2,2	350–380	109–118
Aluminium Oksida	4,0	10–20	2,5–5,0	700–1.500	175–375
Silikon Karbida	3,2	20	6,25	480	150
Serat					
Aluminium Oksida	3,95	1,38	0,35	379	96
Aramid (Kevlar 49)	1,44	3,6–4,1	2,5–2,85	131	91
Karbon*	1,78–2,15	1,5–4,8	0,70–2,70	228–724	106–407
E-Glass	2,58	3,45	1,34	72,5	28,1
Boron	2,57	3,6	1,40	400	156
Silikon Karbida	3,0	3,9	1,30	400	133
UHMWPE (Spectra 900)	0,97	2,6	2,68	117	121
Kawat Logam					
Baja Berkekuatan Tinggi	7,9	2,39	0,30	210	26,6
Molibdenum	10,2	2,2	0,22	324	31,8
Tungsten	19,3	2,89	0,15	407	21,1

* Istilah “karbon” di samping “grafit” digunakan untuk menunjukkan serat-serat karena mereka dibuat dari daerah kristalin grafit, dan juga material non-kristalin dan daerah dari ketidaksempurnaan kristal

Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

10.2 Komposit Bermatriks Polimer

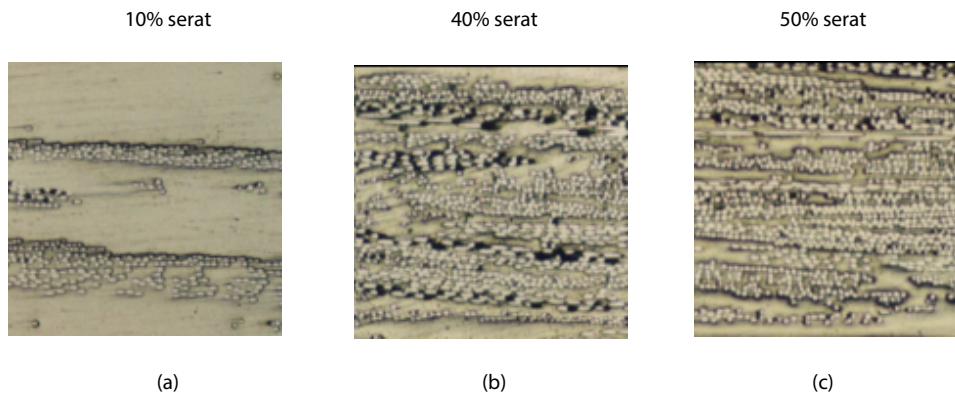
Komposit ini terdiri dari polimer sebagai matriks, dengan berbagai bentuk penguat. Sebagian besar aplikasi rekayasa yang memakai komposit mengaplikasikan komposit bermatriks polimer dengan penguat berbentuk serat, karena sifatnya pada temperatur kamar yang dapat didesain dalam spektrum yang sangat luas, mudah difabrikasi dan relatif murah. Beberapa jenis serat yang banyak dipakai dalam komposit dapat dilihat pada Tabel 10.1. Pada dasarnya polimer memiliki sifat mekanik yang terbatas, namun dengan adanya penguat, material ini dapat memiliki kekuatan tarik, kekakuan, ketangguhan, ketahanan abrasi dan ketahanan korosi yang relatif tinggi. Yang menjadi kekurangan pada material ini adalah ketahanan panas yang rendah serta koefisien ekspansi panas yang besar.

Ada dua jenis polimer yang biasa digunakan sebagai matriks yaitu termoset (epoksi, fenolik) dan termoplastik (*Low Density Polyethylene* (LDPE), *High Density Polyethylene* (HDPE), polipropilen, nilon, akrilik). Berdasarkan material penguatnya, ada beberapa jenis komposit, antara lain

1. Komposit polimer berpenguat serat gelas,
2. Komposit polimer berpenguat serat karbon,
3. Komposit polimer berpenguat serat aramid.

Komposit Polimer Berpenguat Serat Gelas

Komposit ini mengandung serat gelas sebagai penguat, baik dalam bentuk kontinyu atau diskontinyu dalam matriks polimer yang biasa disebut resin. Diameter serat gelas umumnya 3 – 20 μm . Jumlah serat dapat divariasikan dalam proses pembuatannya. Jumlah serat sangat menentukan kekuatan tarik material ini. Semakin banyak serat pada umumnya akan meningkatkan kekuatan komposit ini hingga level tertentu. Gambar 10.2. merupakan gambar struktur mikro komposit serat gelas CSM (*chopped strand mats*)-poliester yang memiliki variasi jumlah serat. Selain jumlah serat, hal lain yang harus diperhatikan



GAMBAR 10.2 Perbedaan struktur mikro dari komposit serat gelas CSM(*chopped strand mats*) -poliester dengan variasi jumlah serat (a) 10%, (b) 40%, dan (c) 50%.

untuk sebuah komposit polimer berserat gelas adalah sifat permukaan. Sifat permukaan serat gelas sangat penting karena setiap cacat kecil pada permukaan akan sangat menentukan kekuatan tarik. Cacat permukaan dapat terjadi karena penggosokan atau abrasi permukaan oleh material keras lainnya. Aplikasi material ini antara lain: bodi otomotif atau kapal, pipa plastik, tangki air, kursi angkutan umum, dan lain-lain.

Salah satu contoh serat gelas antara lain E-glass, yaitu yang mengandung 52–56 % SiO_2 , 12–16 % Al_2O_3 , 16–25 % CaO dan 8–13 % B_2O_3 . Material ini memiliki sifat insulasi yang sangat baik terhadap listrik, oleh karena itu material ini diberi nama E-glass (E berarti elektrik). Contoh lainnya adalah S-glass yang mengandung penguat SiO_2 , MgO dan Al_2O_3 . Huruf S pada penamaannya berarti *strength* dimana menandakan sifatnya yang lebih kuat daripada jenis E-glass. Aplikasi yang paling umum untuk material ini adalah pada industri pesawat. Jenis lainnya yaitu S+R-glass yang merupakan serat gelas yang paling kuat dan paling mahal. Sedangkan C-glass merupakan serat gelas yang didisain lebih untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan korosi.

Komposit Polimer Berpenguat Serat Karbon

Komposit ini mengandung serat karbon sebagai penguatnya. Serat karbon terdispersi secara kontinu atau terputus. Umumnya, harga komposit polimer berpenguat serat karbon relatif mahal, tetapi memiliki rasio modulus elastisitas dan kekuatan yang sangat tinggi terhadap beratnya.

Sifat serat karbon antara lain:

1. Memiliki modulus spesifik dan kekuatan spesifik yang paling tinggi di antara seluruh jenis penguat.
2. Kekuatan tarik dan modulus tarik tetap dipertahankan pada temperatur tinggi.
3. Tahan oksidasi.
4. Pada temperatur kamar tidak dipengaruhi oleh uap air atau pelarut lainnya.
5. Karakteristik fisika dan kimianya beragam, sehingga bisa dipilih sesuai aplikasi.
6. Proses pembuatannya relatif tidak mahal.

Struktur karbon tidak seluruhnya kristalin, tapi terdiri dari daerah grafit dan daerah kristalin.

Daerah non kristalin adalah daerah dimana terjadi ketidakteraturan dari susunan heksagonal karbon, yang merupakan karakteristik struktur grafit. Aplikasi material ini adalah: peralatan olah raga (pancing, stick golf, raket), bejana bertekanan, struktur pesawat terbang, tabung motor roket.

Komposit Polimer Berpenguat Serat Aramid

Serat aramid ditemukan pada awal 1970-an. Secara kimia, material serat ini termasuk kelompok poliparafenilen tereftalamida. Pada mulanya material ini diciptakan lebih untuk menggantikan baja yang ada pada ban kendaraan bermotor. Serat aramid umumnya digabungkan dengan resin epoksi atau poliester.

Sifat-sifat serat aramid antara lain:

1. Kekuatan tarik yang tinggi
2. Modulus elastisitas yang tinggi
3. Elongasi yang rendah sebelum titik patah
4. Ringan
5. Koefisien ekspansi termal yang rendah
6. Ketahanan impak yang tinggi
7. Tahan api

Namun, serat aramid memiliki beberapa kelemahan yaitu tidak kedap air, susah dipotong dan kekuatan tekan yang relatif rendah. Ada berbagai merek dagang aramid diantaranya Kevlar dan Nomex. Serat Kevlar diproduksi melalui proses ekstrusi dari suatu bakalan melalui sebuah pemintal. Proses ekstrusi tersebut memberikan kekuatan pada serat Kevlar, semakin panjang tarikannya maka akan semakin kuat. Komposit polimer berpenguat serat aramid biasanya diproduksi dengan proses cetakan terbuka, cetakan tertutup dan *poltrusion*. Aplikasi material ini adalah: produk anti peluru (rompi, tameng, dan lain-lain), alat olah raga, rem otomotif, dan lain-lain.

10.3 Komposit Bermatriks Logam

Sesuai namanya, material ini memiliki matriks dari logam yang bersifat ulet. Umumnya, material komposit bermatriks logam dipakai pada temperatur lebih tinggi dibandingkan dengan material logamnya. Berbagai jenis logam dapat dipakai sebagai matriks komposit. Bentuk penguatnya dapat berupa partikel, serat (baik kontinu maupun diskontinu), dan whiskers. Sifat dari beberapa komposit logam dengan penguat berbentuk serat dapat dilihat pada Tabel 10.2.

TABEL 10.2 Sifat beberapa komposit logam yang diperkuat dengan serat kontinu dan searah.

Serat	Matriks	Fraksi Volume Serat (vol%)	Densitas (gr/cm ³)	Modulus Tarik Longitudinal (GPa)	Kekuatan Tarik Longitudinal (MPa)
Karbon	6061 Al	41	2,44	320	620
Boron	6061 Al	48	–	207	1.515
SiC	6061 Al	50	2,93	230	1.480
Alumina	380.0 Al	24	–	120	340
Karbon	AZ31 Mg	38	1,83	300	510
Borsik	Ti	45	3,68	220	1.270

Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

Pemrosesan komposit bermatriks logam umumnya terdiri dari dua tahap, yaitu konsolidasi atau sintesis atau pengecoran (tahap memasukkan penguat ke dalam matriks logam), diikuti dengan proses pembentukan. Banyak aplikasi dari material ini, misalnya untuk mobil, beberapa komponen mesin mobil menggunakan komposit aluminium diperkuat dengan alumina, sehingga menjadi ringan, tahan aus dan distorsi. Untuk mobil, komposit logam juga dipakai untuk suspensi dan komponen transmisi. Pesawat ulang alik memakai komposit aluminium diperkuat serat boron pada orbiternya. Selain itu, paduan super (berbasis Ni dan Co) juga dibuat komposit dengan penguat logam refraktori, seperti tungsten.

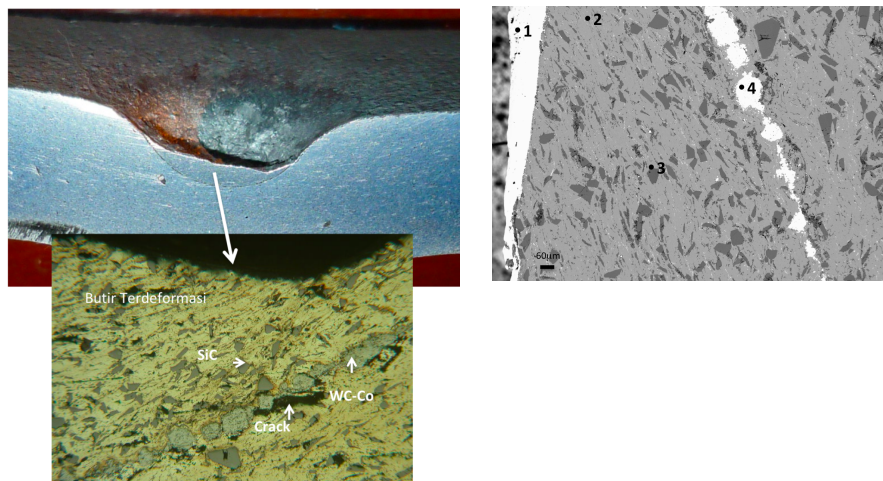
Komposit aluminium berpenguat partikel SiC telah dikembangkan sebagai material tahan peluru. Aluminium yang dipakai adalah Al₇Si₆Mg₅Zn (% berat) yang diperkuat dengan 10 % vol SiC,

melalui proses pengecoran semi solid (*squeeze casting*) pada tekanan 76 MPa. Komposit ini dapat menahan peluru tipe II berkaliber 9 mm (lihat Gambar 10.3). Dari struktur mikro terlihat bahwa matrik aluminium dapat menyerap beban impact kecepatan tinggi dari peluru dan terdeformasi, sementara partikel penguat SiC berpindah dan berkelompok dalam upaya menyerap beban impact. Agar dapat menahan peluru tajam tipe III berkaliber 7,62 mm, matriks komposit yang digunakan adalah Al5Zn6Mg (% berat) dengan 20 % volum SiC yang diberi lapisan permukaan WC-Co dengan metode HVOF (*High Velocity Oxy-Fuel*), lihat Gambar 10.4.



Gambar 10.3. Perforasi komposit Al7Si6Mg5Zn (% berat) dengan 10 % volum SiC yang dapat menahan peluru tipe II berkaliber 9 mm: (a) pengamatan makro, dan (b) struktur mikro yang menunjukkan butir aluminium yang terdeformasi dan partikel SiC yang mengelompok.

Sumber: Bondan T. Sofyan, Dwi Rahmalina, Bambang Suharno, Eddy S. Siradj, *Deformation Behaviour of Silicon Carbide Reinforced Al-7Si Composite after Ballistic Impacts*, *Advanced Materials Research*, Vol. 789 (2013) pp 33-36)



Gambar 10.4. Komposit bermatriks Al5Zn6Mg (% berat) dengan 20 % volum SiC yang dapat menahan peluru tipe III berkaliber 7,62 mm

Sumber: Dwi Rahmalina, Bondan T. Sofyan, Bambang Suharno, Eddy S. Siradj, Komposit Matriks Aluminium Berpenguat Silikon Karbida sebagai Material Armor, Paten No. IDP000039645, 11 November 2011.

10.4 Komposit Bermatriks Keramik

Seperti telah dibahas pada bab sebelumnya, keramik merupakan material yang tahan oksidasi dan tahan temperatur tinggi, namun memiliki kerapuhan luar biasa, dengan nilai ketangguhan patah yang sangat rendah. Sifat ketangguhan patah ini berhasil diperbaiki dengan mencampur keramik tersebut dengan penguat yang berbentuk partikel, serat atau *whiskers* yang juga terbuat dari keramik. *Whiskers* yang berada pada komposit bermatriks keramik meningkatkan ketangguhan dengan cara menghambat propagasi retak, namun tetap saja tipe patahan dari material ini bertipe getas.

Komposit bermatriks keramik diperkuat dengan serat yang panjang maupun pendek. Proses pembuatannya adalah melalui proses penekanan panas, penekanan panas isostatik atau *sintering* fasa cair. Komposit dengan serat yang panjang diperkuat dengan mono-filamen atau multi-filamen yang panjang, namun yang memberikan efek penguatan terbaik adalah serat mono-filamen. Serat mono-filamen dapat dihasilkan melalui proses *chemical vapor deposition* (CVD) *whiskers* pada substrat yang terbuat dari tungsten atau serat karbon. Tipe perpatahan komposit bermatriks keramik dengan serat yang panjang tidak bertipe getas.

Adapun sifat-sifat yang dimiliki komposit bermatriks keramik dengan serat yang panjang adalah:

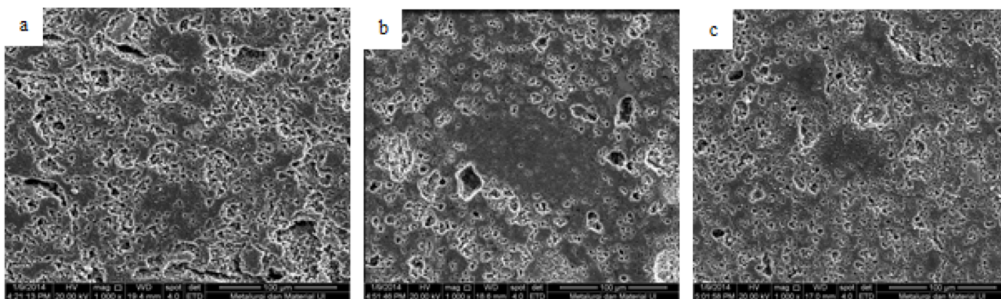
1. Kekuatan mekanik yang tinggi, pada temperatur tinggi sekali pun
2. Ketahanan kejut panas yang tinggi
3. Kekakuan yang tinggi
4. Stabilitas panas yang tinggi
5. Ketahanan korosi yang tinggi, pada temperatur tinggi sekali pun
6. Berat jenis yang rendah

Salah satu contoh komposit bermatriks keramik dengan serat yang panjang adalah komposit bermatriks silikon karbida. Material ini difabrikasi dengan metode infiltrasi uap kimia atau infiltrasi fasa cair dari suatu material matriks ke sebuah bakalan yang terbuat dari serat silikon karbida. Pemakaian material ini adalah sebagai lapisan pembakaran pada turbin, *heat exchanger*, komponen pendorong roket, penyaring cairan yang panas dan aplikasi-aplikasi pada temperatur tinggi lainnya. Contoh lainnya yaitu komposit karbon-karbon yang juga dihasilkan melalui metode infiltrasi uap kimia atau infiltrasi fasa cair dari material matriks ke suatu bakalan yang terbuat dari serat karbon. Material ini sering dipakai untuk elemen pemanas, sistem rem canggih, cetakan *hot-pressing*, dan komponen mesin pesawat. Komposit karbon-karbon pernah dipakai oleh pesawat luar angkasa Columbia pada bagian panel sayapnya. Namun, pemakaiannya kini mulai diperhitungkan menyangkut bencana yang terjadi pada saat Columbia memasuki atmosfer bumi seperti yang terlihat pada Gambar 10.5.



GAMBAR 10.5 Ledakan pesawat Columbia ketika memasuki atmosfer bumi pada 1 Februari 2003. Ledakan disebabkan karena kegagalan pada panel sayap Columbia yang terbuat dari komposit karbon-karbon. Penyebab kegagalan bukan karena komposit ini tidak mampu menahan panas, melainkan berlubang karena terkena busa saat lepas landas. Sebelumnya para ahli tidak percaya bahwa busa yang lunak dapat merusak komposit yang keras tersebut, namun setelah dilakukan penyelidikan maka terbukti bahwa energi impact yang besar dapat melubangi komposit karbon-karbon yang getas.

Contoh komposit keramik yang lain adalah alumina (Al_2O_3) dengan silikon karbida (SiC) dan zirkonia (ZrO_2). SiC dan ZrO_2 digunakan sebagai material penguat, dimana keduanya dapat mengurangi kegetasan alumina dan meningkatkan ketangguhan patahnya. Pemrosesan komposit keramik ini adalah melalui kompaksi serbuk dan sinter. Untuk menurunkan temperatur sinter sebesar 100-150 °C dan memperpendek waktu sinter (2-4 jam) ditambahkan material aditif niobium pentoksida (Nb_2O_5). Penambahan aditif tersebut diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemrosesan komposit keramik, dimana dengan penggunaan energi yang sama akan dihasilkan sifat fisik dan mekanik komposit keramik yang lebih baik. Proses pembuatan komposit keramik ini diawali dengan pencampuran serbuk, dilanjutkan dengan kompaksi pada tekanan 256,28 MPa (500 psi). Untuk memperkuat hasil kompaksi dilakukan pemanasan awal pada temperatur 800 °C selama 4 jam. Proses sintering dilakukan pada temperatur 1400 °C selama 4 jam. Struktur mikro komposit keramik dengan variasi Nb_2O_5 dapat dilihat pada Gambar 10.6.

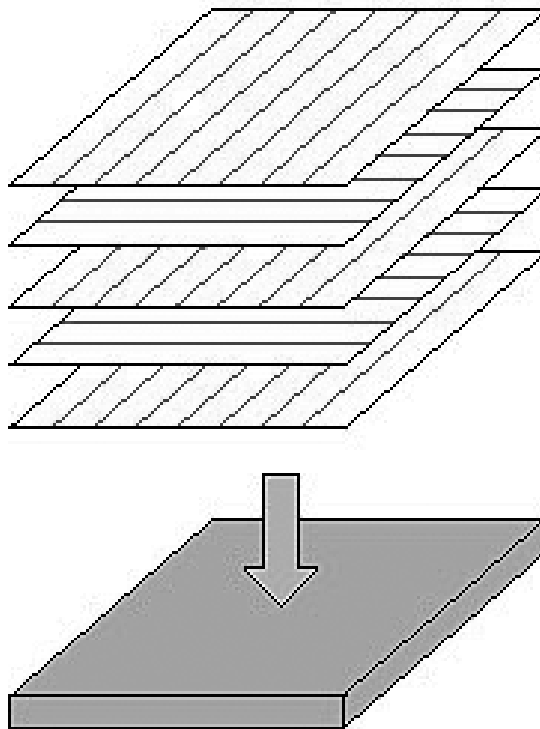


GAMBAR 10.6. Struktur mikro (SE-SEM) sampel komposit keramik Al_2O_3 -10SiC-5ZrO₂O₅ pada perbesaran 1000x dengan penambahan (a) 2, (b) 4, (c) 6 % berat Nb

10.5 Komposit Struktural

Komposit Struktural struktural biasanya terdiri dari material homogen dan material komposit, dimana sifatnya bukan hanya tergantung dari sifat material penyusunnya, namun juga tergantung pada desain geometrinya. Yang termasuk komposit struktural adalah komposit laminar dan panel *sandwich*.

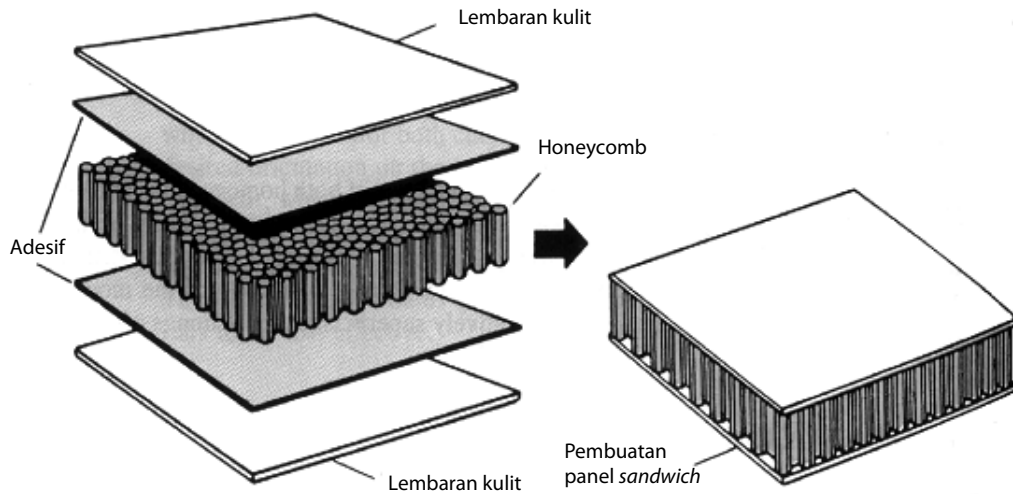
Komposit laminar terdiri atas lapisan-lapisan yang memiliki kekuatan pada arah tertentu, misalnya kayu atau komposit polimer berpenguat serat searah dan kontinu. Lapisan-lapisan tersebut ditumpuk dengan urutan arah serat tertentu (lihat Gambar 10.7). Jadi, komposit laminar memiliki kekuatan yang tinggi pada arah tertentu yang sudah didesain. Contoh komposit laminar adalah kayu lapis, kulit sayap pesawat terbang, papan ski, dan lain-lain.



GAMBAR 10.7 Susunan lapisan-lapisan pada komposit laminar yang arah setiap lapisannya sudah didesain sebelumnya.

Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

Panel *sandwich* terdiri atas dua lapisan yang sangat kuat sebagai kulit terluar, di mana dipisahkan oleh inti yang terbuat dari material yang kurang padat, di mana memiliki kekakuan dan kekuatan lebih rendah. Kulit terluar akan menerima beban bidang terbesar beserta tegangan tekuk. Material yang umum dipakai sebagai kulit terluar adalah komposit polimer berpenguat serat, titanium, aluminium, atau baja.



GAMBAR 10.8 Ilustrasi skematis dari konstruksi inti honeycomb pada panel sandwich.

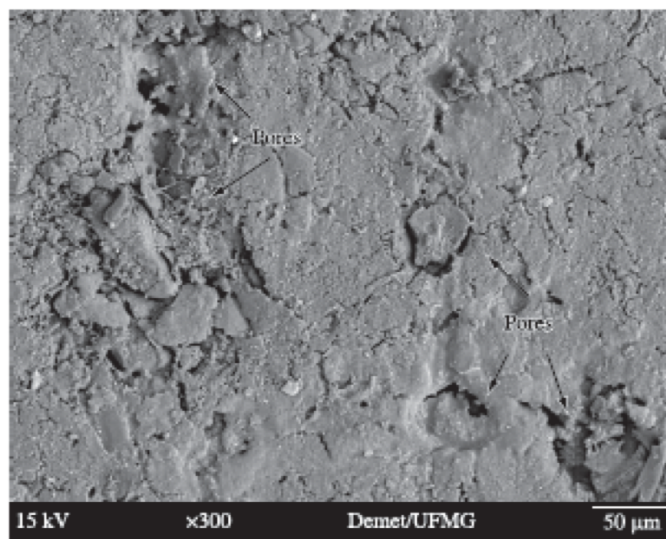
Sumber: Diadaptasi dari William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

Inti dari panel *sandwich* memiliki dua fungsi, yaitu memisahkan kedua kulit dan menahan deformasi yang terjadi pada arah tegak lurus bidang kulit, serta memberikan kekakuan geser sepanjang bidang yang tegak lurus bidang kulit, lihat Gambar 10.8. Banyak material yang dipakai sebagai inti, seperti busa (*foam*) polimer, karet sintetis, semen inorganik, atau kayu balsa. Inti yang juga banyak digunakan adalah struktur sarang lebah (*honeycomb*), di mana merupakan foil tipis yang dibentuk menjadi sel-sel heksagonal dengan sumbu tegak lurus terhadap bidang kulit. Material *honeycomb* dapat dibuat dari material yang sama dengan kulitnya.

Aplikasi panel *sandwich* terbesar adalah pada sayap, *fuselage*, dan ekor sebuah pesawat terbang. Selain itu, panel *sandwich* juga dipakai sebagai atap, lantai, dan dinding bangunan.

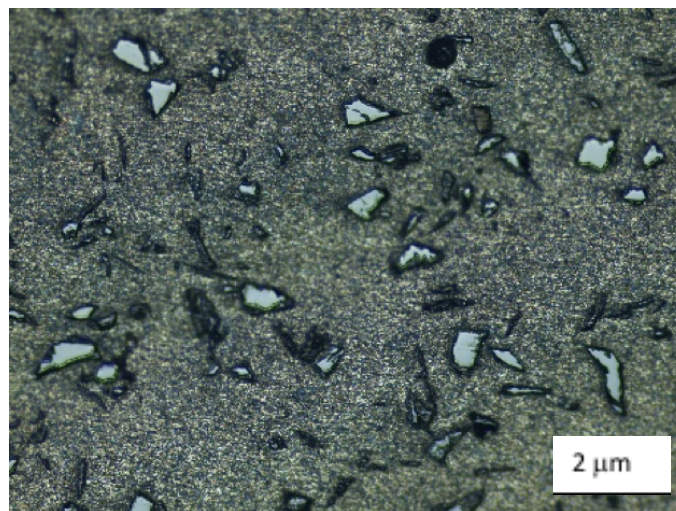
Latihan

1. Jelaskan jenis komposit berdasarkan material matriksnya.
2. Jelaskan teknik pembuatan komposit polimer berpenguat serat gelas dan komposit logam berpenguat partikel.
3. Jelaskan fungsi kulit dan inti pada panel *sandwich*.
4. Gambar di bawah ini adalah stuktur mikro dari komposit dengan matriks tanah lempung dan 40 vol. serbuk steatit.(magnesium silikat) sebagai penguat. Terdapat beberapa porositas di sekitar steatit.
 - (a) Jelaskan bagaimana tanah lempung dan steatit menghasilkan efek sinergitas sebagai sebuah komposit. Apa peran masing-masing fasa di dalam komposit ini?
 - (b) Bagaimana pengaruh porositas terhadap sifat komposit? Jelaskan.
 - (c) Berat jenis tanah lempung dan steatit masing-masing adalah 1.31 and 0.76 g/cm³. Hitungnberat jenis komposit.



Sumber: diadaptasi dari Panzera et al. Materials Research. 2010; 13(4): 535-540.

5. Gambar di bawah ini adalah struktur mikro dari komposit dengan matriks Al-8Zn-4Mg-1Cu (% berat) dengan penguat 15 vol. % SiC
- (a) Bila densitas matriks aluminium adalah $2,7 \text{ g/cm}^3$ sementara densitas SiC adalah $3,21 \text{ g/cm}^3$, hitung densitas komposit menggunakan Hukum Pencampuran.
 - (b) Hasil pengukuran densitas menggunakan prinsip Archimedes menunjukkan bahwa densitas komposit adalah $2,60 \text{ g/cm}^3$. Mengapa densitas hasil pengukuran lebih kecil daripada densitas hasil perhitungan menggunakan Hukum Pencampuran?



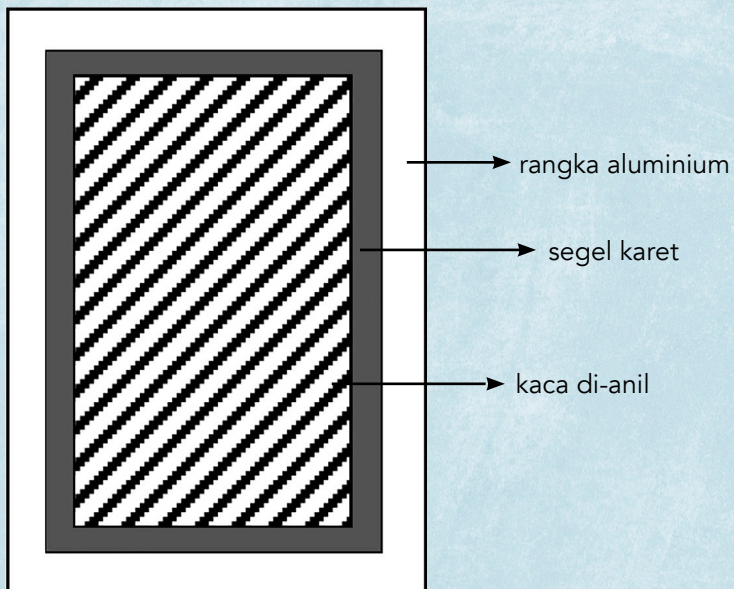
Sumber: Bondan T. Sofyan, Dwi Rahmalina, Bambang Suharno, Eddy S. Siradj, *Deformation Behaviour of Silicon Carbide Reinforced Al-7Si Composite after Ballistic Impacts*, Advanced Materials Research, Vol. 789 (2013) pp 33-36

KUMPULAN SOAL KOMPREHENSIF

Pertanyaan 1

Pertanyaan ini terkait dengan konstruksi jendela seperti diilustrasikan Gambar 11.1 di bawah ini.

- A. Ketika mengalami beban kejut, mengapa bingkai aluminium cenderung berubah bentuk sementara kaca cenderung pecah?
- B. Apa yang terjadi pada segel karet jika beban kejut membengkokkan aluminium dan memecahkan kaca? Jelaskan mengapa itu terjadi.

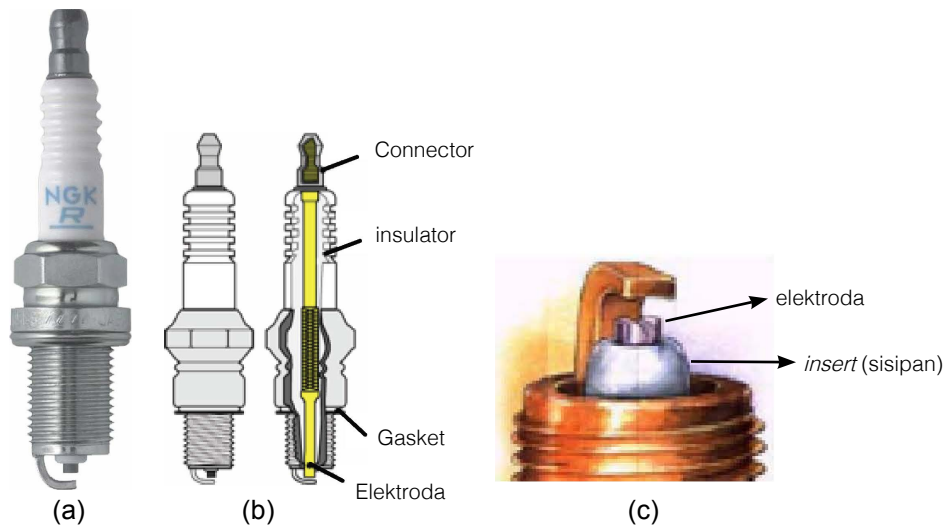


GAMBAR 11.1 Struktur jendela berbingkai aluminium.

Pertanyaan 2

Gambar 11.2 menunjukkan busi dan potongannya. Cara kerja busi adalah dengan memaksa listrik untuk memercik melewati celah setelah elektroda, seperti sambaran petir. Listrik harus berada pada tegangan yang sangat tinggi untuk dapat melompati celah dan menghasilkan percikan yang baik. Tegangan pada busi bisa berkisar antara 40.000 hingga 100.000 volt. Busi harus memiliki lorong terisolasi agar tegangan tinggi dapat melakukan perjalanan ke elektroda, dan selanjutnya melompati celah, untuk kemudian dikonduksikan ke blok mesin dan dibumikan (*grounded*). Busi juga harus tahan terhadap panas dan tekanan yang ekstrim di dalam silinder, dan harus dirancang agar endapan dari aditif bahan bakar tidak menumpuk di elektroda.

- Identifikasi jenis material yang digunakan di setiap bagian busi. Jelaskan alasannya berdasarkan mekanisme kerja seperti telah dijelaskan di atas.
- Jelaskan ikatan atom pada setiap jenis material yang digunakan dalam busi.
- Ujung elektroda diisolasi dengan *insert* (sisipan) (lihat Gambar 11.2 (c)). Fungsi *insert* adalah untuk mengisolasi tegangan tinggi di elektroda, memastikan bahwa percikan terjadi di ujung elektroda dan tidak di tempat lain. Selain itu, *insert* juga berfungsi untuk membantu membakar endapan (i) Jenis material apa yang cocok untuk digunakan sebagai *insert*? (ii) Mengapa?
- Jika Anda diminta untuk melakukan pengujian tarik pada material *insert* (Gambar 11.2 (c)), prediksi dan ilustrasikan kurva tegangan-regangan yang akan Anda dapatkan.

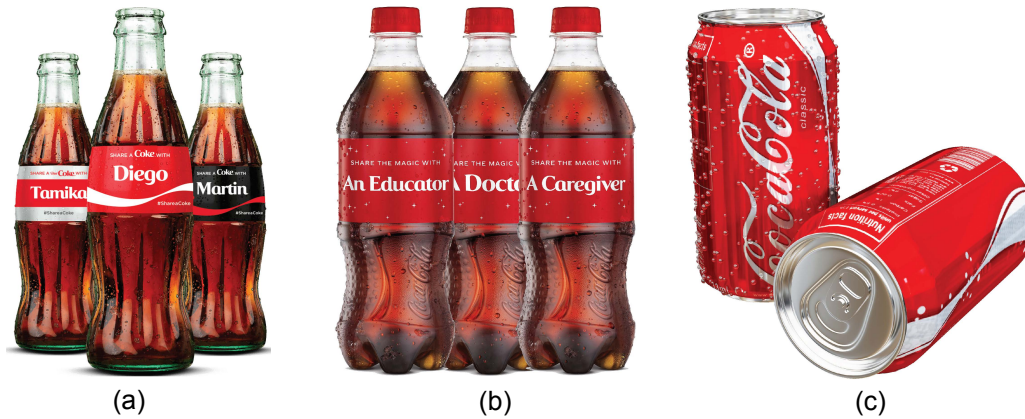


GAMBAR 11.2 (a) Busi, (b) potongan melintang busi, (c) ujung elektroda dan *insert* (sisipan).

Pertanyaan 3

Buat sketsa dan bandingkan kurva tegangan-regangan dari elastomer, plastik, logam dan keramik. Jelaskan mengapa mereka berperilaku berbeda.

Pertanyaan 4

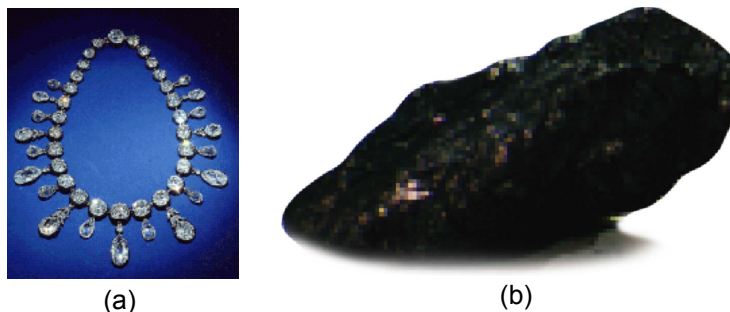


GAMBAR 11.3 Tiga jenis kemasan minuman berkarbonasi (a) gelas, (b) plastik, (c) logam. Diadaptasi dari W.D. Callister & D.G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering 8th ed.*, 2010.

Sumber www.freepik.com

- Gambar 11.3 adalah tiga jenis kemasan minuman berkarbonasi (berbunyi “ssss” bila dibuka pertama kali). Jelaskan kelebihan dan kekurangan dari masing-masing jenis, dalam hal sifat fisik dan mekanik, harga dan kinerja/kemampuannya.
- Jelaskan urutan pemrosesan dari “kaleng” minuman di atas (Gambar 11.3.c), mulai dari bijihnya sampai produk akhir.
- Apa jenis paduan aluminium yang dipakai untuk kaleng minuman tsb? Mengapa dipakai paduan tersebut

Pertanyaan 5



GAMBAR 11.4 (a) Kalung berlian, (b) Bongkahan grafit.

Gambar 11.4 menunjukkan kalung berlian dan bongkahan grafit .

- Jelaskan perbedaan antara berlian dan grafit , dalam hal ikatan atom, kristalinitas, sifat fisik dan sifat mekanik .
- Mengapa berlian tidak berwarna, sementara grafit berwarna hitam ? Jelaskan jawaban Anda.

Pertanyaan 6



(a)



(b)



(c)

GAMBAR 11.5 (a) Mobil kelas atas (Audi A8), (b) mobil kelas menengah-bawah (Daihatsu Espass) yang dapat ditemui di jalan-jalan Jakarta dan (c) mobil balap Formula 1.

- A. Mengapa Audi 8 menggunakan paduan aluminium untuk bodinya, sementara Daihatsu Espass menggunakan baja dan Formula 1 menggunakan komposit serat karbon? Jelas jawaban anda dalam hal sifat fisik dan mekanik, harga, kinerja kemampuan.
- B. Jelaskan urutan pemrosesan bodi Espass, mulai dari biji besi hingga produk akhir.
- C. Jelaskan jenis baja yang dipakai untuk bodi Espass. Mengapa menggunakan baja jenis tsb?
- D. Jelaskan mikrostruktur material bodi Espass, termasuk jelaskan tentang fasa-fasa yang terdapat didalamnya.
- E. Apa jenis aluminium yang digunakan untuk bodi Audi A8? Mengapa digunakan jenis aluminium tersebut?

Pertanyaan 7



(a)



(b)

GAMBAR 11.6 Baut (dan mur) yang digunakan dalam (a) struktur jembatan dan (b) di komputer laptop.

- A. Jenis logam apa yang biasanya digunakan untuk baut dan mur di atas? Bisakah kita menggunakan bahan yang sama untuk kedua aplikasi? Uraikan jawaban anda.
- B. Jelaskan rute pemrosesan mur dan baut, termasuk rincian proses untuk membuat kepala baut dan ulir baut.
- C. Jelaskan struktur mikro baut dan mur untuk struktur jembatan, termasuk fasa struktur mikro yang dimilikinya.
- D. Jika kita ingin mengetahui kekuatan baut, apa yang harus kita lakukan? Jelaskan secara rinci, termasuk standar yang akan anda gunakan.

Pertanyaan 8



(a)



(b)

GAMBAR 11.7 (a) Pegas dari sebuah pulpen, dan (b) Pegas dari peredam kejut sepeda motor.

- A. Jelaskan sifat mekanik utama yang diperlukan oleh sebuah pegas.
- B. Jelaskan perbedaan utama dari sifat mekanik kedua pegas pada Gambar. 11.7 (a) dan (b).
- C. Jelaskan bahan pembuat pegas. Sebutkan dengan rinci spesifikasi bahan untuk masing masing pegas tersebut.
- D. Jelaskan proses pembuatan pegas.
- E. Apakah ada perbedaan dalam proses pembentukan kedua jenis pegas? Mengapa?

Pertanyaan 9



GAMBAR 11.8 Gergaji Tangan

- A. Jelaskan jenis baja yang digunakan untuk membuat gergaji tangan tersebut. Jelaskan dengan rinci spesifikasi baja tersebut.
- B. Bagaimana proses manufaktur gergaji tangan tersebut?
- C. Setelah digunakan untuk beberapa waktu, gergaji tangan kadang-kadang menjadi tumpul. Bila dihubungkan dengan sifat material, apa terjadi pada bahan gergaji sehingga dapat menjadi tumpul ?

Pertanyaan 10



GAMBAR 11.9 Panci dan tutupnya yang terbuat dari aluminium.

- A. Mengapa panci dan tutupnya tersebut terbuat dari aluminium? Apa bahan alternatif selain aluminium ?
- B. Bagaimana proses pembuatan badan panci, tutup dan pegangan panci tersebut?
- C. Jika panci tersebut digunakan untuk memasak, bagaimana perubahan sifat fisik dan mekanik yang terjadi?

Pertanyaan 11



(a)



(b)

GAMBAR 11.10 Dua kabinet arsip, (a) yang masih baru dan (b) yang sudah rusak.

- A. Jelaskan jenis baja dipakai untuk membuat kabinet tersebut. Sebutkan spesifikasi baja tersebut dengan rinci.
- B. Jelaskan proses pembuatan masing-masing komponen dari kabinet arsip tersebut (badan kabinet, laci dan pegangan laci).
- C. Kabinet arsip tersebut dibuka paksa sehingga rusak seperti tampak pada gambar di atas. Analisis kerusakan yang terjadi. Jelaskan kerusakan tersebut bila ditinjau dari aspek sifat material.

Pertanyaan 12



GAMBAR 11.11 Sebuah tangga aluminium.

- A Mengapa tangga tersebut dibuat dari aluminium Apa bahan alternatif untuk membuat tangga?
- B Jelaskan proses pembuatan tangga tersebut.
- C Apakah sebuah tangga didesain untuk bekerja di daerah elastis atau plastis? Jika dua orang yang besar memanjat tangga tersebut sedemikian sehingga melewati batas maksimum beban yang dapat diterima, apa yang akan terjadi pada tangga tersebut Jelaskan dengan rinci terkait aspek sifat material.

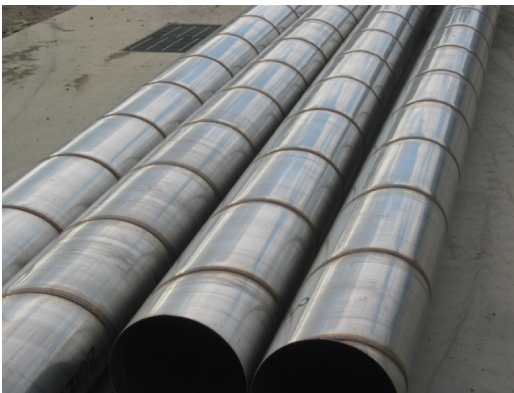
Pertanyaan 13



GAMBAR 11.12 Kaleng minuman yang terbuat dari aluminium.

- A. Mengapa kaleng minuman tersebut terbuat dari aluminium? Apa material alternatif yang dapat digunakan untuk membuat kaleng minuman tersebut?
- B. Bagaimana proses manufaktur kaleng minuman tersebut?
- C. Kita dapat meremas kaleng minuman tersebut menggunakan tangan kita hingga penyok (lihat gambar), sehingga menjadi mampat (kecil). Ketika kita meremas kaleng tersebut sampai penyok, deformasi apa yang terjadi pada material? Jelaskan perubahan sifat mekanik yang terjadi selama peremasan tersebut.

Pertanyaan 14



(a)

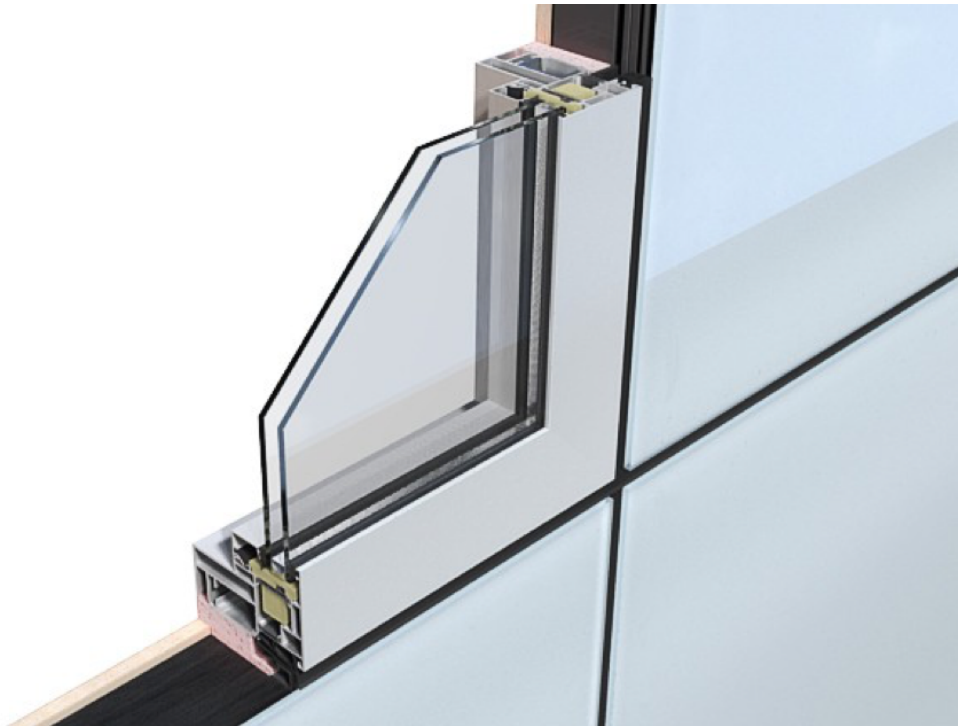


(b)

Gambar 11.13 (a) Pipa spiral "mentah" dan (b) pipa spiral yang dipakai sebagai *penstock* (pipa peluncur air) pada pembangkit mikrohidro.

- A. Jelaskan jenis baja yang digunakan untuk membuat pipa spiral tersebut. Sebutkan jenis bajanya secara rinci.
- B. Jelaskan proses manufaktur untuk membuat pipa spiral.
- C. Pada sebuah pembangkit listrik mikrohidro, pipa spiral dapat digunakan sebagai pipa *penstock*, yang berfungsi untuk mengalirkan air dari sumbernya menuju turbin pembangkit, dimana air mengalami peningkatan tekanan sepanjang aliran. Apa yang harus diperhatikan ketika menggunakan pipa spiral untuk aplikasi *penstock* tersebut? Jelaskan dalam konteks sifat material.

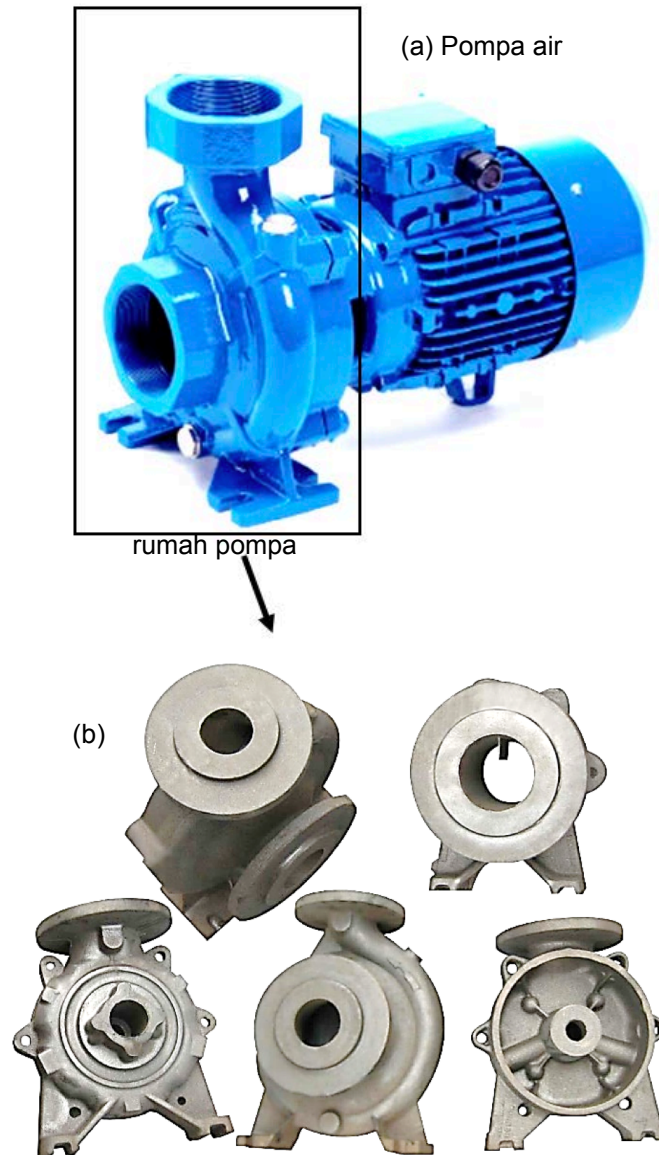
Pertanyaan 15



Gambar 11.13 Rangka jendela terbuat dari aluminium.

- A. Mengapa rangka jendela tersebut terbuat dari aluminium?
- B. Bagaimana proses manufaktur untuk membuat rangka jendela tersebut?
- C. Pada daerah deformasi apa, rangka jendela tersebut menjalankan fungsinya? Bila terkena hantaman benda keras dan tajam, apa yang akan terjadi pada rangka jendela tersebut? Jelaskan.

Pertanyaan 16



Gambar 11.15. (a) Sebuah pompa air, yang terdiri dari rumah pompa dan motor listrik
(b) Rumah pompa yang dilihat dari berbagai sudut..

- A. Jelaskan jenis logam yang dipakai sebagai rumah pompa. Jelaskan spesifikasi logam tersebut secara rinci.
- B. Jelaskan proses manufaktur dari rumah pompa.
- C. Jika pompa air terjatuh secara tidak sengaja, rumah pompa dapat retak. Dalam hal sifat material, apa yang terjadi pada rumah pompa sehingga dapat mengalami retak?

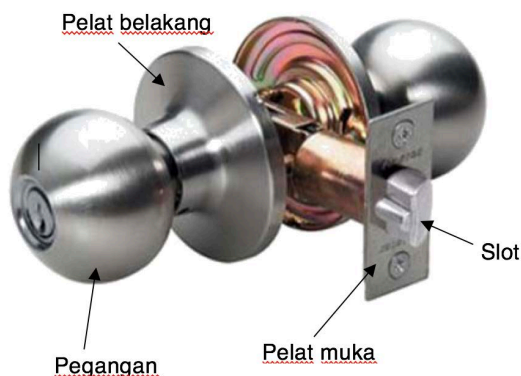
Pertanyaan 17



Gambar 11.16. Kabel listrik dari aluminium. Kabel aluminium ini biasanya dipakai untuk jaringan listrik tegangan tinggi.

- A. Mengapa untuk listrik tegangan tinggi dipakai kabel aluminium? Apa material alternatif untuk dipakai sebagai kabel tegangan tinggi?
- B. Apa jenis produk setengah jadi yang dipakai untuk membuat kabel? Bagaimana proses pembuatannya?
- C. Selama digunakan sebagai kabel jaringan tegangan tinggi, bagaimana perubahan sifat mekanik dan fisik yang dapat terjadi?

Pertanyaan 18



- A. Jelaskan material yang dapat dipakai untuk ke empat bagian utama tersebut (jelaskan hingga spesifikasi rinci). Jelaskan mengapa anda memilih material tersebut untuk setiap bagiannya.
- B. Jelaskan proses manufaktur dari masing masing bagian utama kunci pintu tersebut.

Gambar 11.17. Kunci pintu, yang terdiri dari empat bagian utama, yaitu: pegangan, pelat belakang, pelat muka dan slot.

DAFTAR PUSTAKA

- Anyalebechi, P.N. 1995. "Analysis of the Effects of Alloying Elements of Hydrogen Solubility in Liquid Aluminium Alloys", *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 33/No. 8 (1209–1216).
- ASM International. 1991. *Engineered Materials Handbook volume 4 : Ceramics and Glasses*. USA: ASM International.
- ASM International. 1992. *ASM HandBook volume 2 , Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials* . USA: ASM International.
- Brady, G.S. dan H.R. Clauser. 1989. *Materials Handbook* . 12th ed. New York: McGraw-Hill.
- Budinski, K.G. 1989. *Engineering Materials : Properties & Selection* . 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- William D Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, *Materials Science And Engineering An Introduction* 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010
- Djaprie, S. 1991. *Ilmu dan Teknologi Bahan* . Edisi terjemahan. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Elihu, B.F. 1988. *Superalloy : A Technical Guide*. ASM International-West Hartford.
- Gupta, A.K., D.J. Lloyd, dan S.A. Court. 2001. "Precipitation Hardening in Al-Mg-Si Alloys With and Without Excess Si", *Material Science and Engineering A316* (11–17).
- Habashi, F. 1980 *Extractive Metallurgy volume 2*. Paris: Science Publishers.
- Hatch, J.E. (ed.). 1984. *Properties and Physical Metallurgy*. Ohio: American Society for Metals, Metals Park.
- Honorius, R. 2004. *Pengantar Material Sains I Buku Atom-Molekul-Padat*. Yogyakarta: Penerbit Tabernakelindo.
- Hornbogen, E. 2001. "Hundred Years of Precipitation Hardening", *Journal of Light Metals* 1 (127–132).
- Musikant, S. 1990. *What Every Engineer Should Know About Ceramics*. New York-Basel-Hong Kong: Marcel Dekker, Inc
- Smallman, R.E. 1991. *Metalurgi Fisik Modern*. Jakarta: Penerbit PT Gramedia Pustaka utama
- Surdia, T. dan Shinroku Saito. 1985. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.
- Van Vlack, L.H. 1980. *Elements of Materials Science & Engineering*. 4th ed. Addison Wesley Publishing Company.

Indeks

A

Aluminium *cladding* 82
 pengerjaan (*wrought aluminium*) 81, 82
 smelter 80, 81
 tuang (*cast aluminium*) 81
Amu (*atomic mass unit*) 10
Anil pelepasan tegangan 99, 127, 204
 penuh (*full annealing*) 125-127
 proses 126
Annealing point 153
Awan elektron 12, 20

B

Baja HSLA 63
 tahan peluru 7
Bakalan (*green*) 124, 128, 213, 214, 222
Bakalan (*preform*) 181, 224
Batas butir 21, 22, 66, 98, 100, 145, 151, 152, 204
 elastis 33
 proporsional 31, 33
Beban impak 39, 202, 223
 kejut 25, 39, 229
Bilangan koordinasi 191, 192, 193, 215
Blowing 209, 210
Bolzano 88
Bottom-blown vessel 60
Brittle 35

C

Cacatflashes 180
 shortshot 180

Cairan superdingin (*supercooled liquid*) 208-209
Calendering 184
Carstic bauxite 78
Cast product 77
Ceramic matrix composites 218
Continuous casting 57, 61, 62, 108, 109

D

Dapur Oksigen Basa 57, 60, 62
Demagnetisasi 207
Derajat kristalinitas 174
Diamagnetik 45, 46, 84
Die casting 108-112
 steel 66
Directional 18
Drain casting 212

E

E-glass 219, 220
Eddy-current 207
Electroplating 105
Electrorefining 104
Electrowining 85, 102, 103
Energi elastis 204
 impak (E) 39, 40, 225
 regang 148
 yang diserap (E) 39, 40
Extrusion blow moulding 181

F

Feldspar 213
Fiber forming 209, 210
Flake 72
Fluidised bed 78
Flux 60, 62
Fullerenes 201
Fused silica 42, 197, 208, 209

G

Garis solvus 158, 159
 Gaya Coulomb 16
Glass tempering 209
 GP zone 158, 160
Grey cast iron 72

H

Harga impak (HI) 39
Holding furnace 80, 81
 Homopolimer 169
Hot metal pre-treatment 58
 Hukum Hooke 25, 31, 33
Hysteresis loss 207

I

Ikatan primer 16
 sekunder 16, 20, 171, 173
 Impurities 782
 Indentasi 38, 52-53
 Inert 14, 60, 104, 134
 Injection blow moulding 181
 Intermetalik 99, 100, 141, 156-158
Investment casting 108, 109, 113, 114

K

Kekakuan (*stiffness*) 25, 26, 31, 219, 224, 226, 227
 Kekuatan patah (*fracture strength*) 34, 189, 204, 215
 tarik (*tensile strength*) 34
 Keramik piezoelektrik 6
 Ketangguhan (*toughness*) 26, 35

Ketangguhan patah regangan bidang (*plane strain fracture toughness*) 205
 Keuletan (*ductility*) 34
 Kompleks aurosianida 102
 Kopolimer 169
 Kristalografis 21, 22

L

Laju nukleasi (pembentukan inti) 159
 Lapisan protektif (*coating*) 87, 94
 Larutan buckminsterfullerene 2, 3
Lateritic bauxite 78
 Lepas tegang 84
Lost-wax casting 111
 Luas penampang di bawah takik (A) 40

M

Magnetherm 69
 Magnetisasi 151
Magnetostrictive 6
Malleable cast iron 56
 Material amorf 22
 cerdas (*smart materials*) 6,8
 dielektrik 205
 militer 6
 refraktori 90, 93, 167, 170-177
 Mer 167, 170-177
 Mesin extruder 181
Metal matrix composites 218
 Metode offset 34
 Momen putar (*spin*) 12
Military specification 6
 standard 6

N

Nodular cast iron 72
Non-directional 17, 19

O

Orowan looping 161

INDEKS

P

Paduan super 51, 97-100, 106, 222
 Panelsandwich 226, 227
 Paramagnetik 45, 46
 Penciptan (*necking*) 34
 Pengerasan regang 83, 89, 96, 145, 146, 148, 150
 Pengujian tekuk 202, 203
 Permittivitas listrik relatif 205
 Persamaan Hall-Petch 152
Pidgeon 88
Pig iron 57, 62
Poisson's ratio 25, 32, 33, 50, 53
 Poliamida 168, 177
 Polimerisasi reaksi bertahap 177
 reaksi rantai 177
 Polimorfi 195, 196, 198, 199, 201
Poltrusion 222
Polymer matrix composites 218
 Posisi interstisi 154
Pre-polymer 178
Pressing 209, 210, 214
Proof stress 34
 Proses anil 126, 127, 148, 209
 elektrolitik 88
 Farben 88
 Hall-Heroult 79-81
 klorinasi 88, 95
 Kroll 91
 penuaan 132, 156-164
 sianidasi 101, 102
 silikotermik 88
 sintering 97, 214, 225
 vulkanisasi 167, 172
 Puncak kekerasan (*peak aged*) 160, 161

R

Rantai aromatik 171
Rapid solidification 22
 Reaksi adisi 169

Reaksi aluminotermik 95
 Retak tegang 84, 173
Rosette 73, 84
Rotomoulding 185, 186

S

S + R-glass 220
 S-glass 220
Scanning electron microscope (SEM) 103
Scrap 60, 62
 Sebelum puncak (*underaged*) 160
Secondary refining 62
Selective nucleation 78
 Setelah puncak (*overaged*) 160
Settling 78
Shiponed-off 80
Sintering 97, 213, 214, 224, 225
 Sirkuit terintegrasi (*integrated circuit*) 5
Slag 57, 58, 60
Softening point 209
Solid casting 212
Sphalerite 192
Sponge iron 59
Stainless steel 62, 69, 71
Steel refining 59
Strain point 208, 209
Stretch blow moulding 181
 Struktur kristal perovskit 193
 kristobalit 195, 196
 kuarsa (*quartz*) 22, 195, 214
 makroskopik
 (*macroscopic structures*) 1
 mikroskopik (*microscopic structures*) 1
 nano (*nano structures*) 1
 tridimit 196

T

Tanur tinggi (*blast furnace*) 56-59
 Teflon 50, 167, 169

Tegangan luluh (*yield strength*) 33,
34, 115, 175
Tembaga pengerjaan 85, 86
 tuang 85, 86
Temperatur sensitasi 100
 transisi gelas 26, 173, 174,
 178, 208, 209
 transisi ulet-ke-getas 39,40
Titik luluh atas (*upper yield point*) 32
 bawah (*lower yield point*) 32
Tool steel 62
Top-blown vessel 60
Top and bottom-blown vessel 60
Tube 111

U

Ulet (*ductile*) 35
UNS (Unified Numbering System)
64, 65, 67, 72, 85, 86

V

Vacancy 157
Vitreous silica 197
Vitrifikasi 213

W

Whiskers 224
White cast iron 72
Working range 209
Wrought product 77

Z

Zinc blende 192, 195

“Bermimpilah setinggi langit...

Jika engkau jatuh, engkau akan jatuh di antara bintang-bintang.”

-Ir. Soekarno

APA KATA MEREKA

TENTANG BUKU PENGANTAR MATERIAL TEKNIK EDISI I

Prof. Ir. Meilinda Nurbanasari, M.T., PhD

*Rektor ITENAS (Institut Teknologi Nasional)
Dosen Teknik Mesin ITENAS, Bandung*

Keren banget. Buku yang sangat bagus, menarik dan menambah wawasan tentang material teknik. Disajikan dengan gaya bahasa yang lugas dan terstruktur, serta mudah dipahami.

Dr. Ir. Diah K. Pratiwi

Dosen Teknik Mesin Universitas Sriwijaya, Palembang

Prof. Bondan memang ahli dalam bidang ilmu material. Gaya bahasa dalam buku ini mudah dipahami dan dimengerti. Buku ini dapat dijadikan salah satu acuan untuk mempelajari dasar-dasar ilmu material.

Dr. Ir. Donanta Dhaneswara, M.S.t

Dosen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia

Buku Pengantar Material Teknik adalah sebuah bukti nyata kontribusi penulis dalam dunia pendidikan yang memberikan banyak manfaat, terutama pada mahasiswa Fakultas Teknik, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, serta mahasiswa politeknik pada umumnya. Materi yang disampaikan relevan dengan pembahasan. Tujuan instruksional yang diberikan di awal bab sangat membantu memfokuskan dan mengetahui kompetensi pemahaman yang akan diberikan. Tidak hanya itu, latihan soal yang diberikan di akhir bab juga membuat mahasiswa mengetahui tingkat pemahaman mereka.

Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

*Dosen Peneliti Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS Insitut Teknologi Sepuluh Nopember
Wakil Pusat Penelitian Internet of Things dan Teknologi Pertahanan (IoTPP) DRPM ITS Surabaya*

Material digunakan di semua aplikasi kehidupan kita sehingga material menjadi penting dipelajari di berbagai disiplin ilmu. Sebagai dosen, saya telah menggunakan dan sangat merekomendasikan buku Pengantar Material Teknik Edisi 1 menjadi buku wajib bagi mahasiswa, kolega, maupun praktisi yang hendak belajar material dengan konsep yang mendasar, lengkap, dan runut. Terima kasih untuk Prof. Bondan yang telah melahirkan karya baik dan bermanfaat ini, semoga buku lanjutan Edisi 2 dapat segera terbit.

Prof. Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng.

*Ketua Departemen Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas Teknik Universitas Indonesia Dosen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia*

Buku yang sangat bagus bagi siapapun yang masih pemula di bidang metalurgi/material untuk memahami apa itu material dan perilakunya, serta juga sangat bermanfaat sebagai “penyegar ilmu” bagi yang pernah mempelajari dan ingin mendalaminya kembali.

Dr. Ir. Aditianto Ramelan

Dosen Teknik Material Institut Teknologi Bandung

Buku ini memberikan penjelasan singkat dan menyeluruh, sehingga dapat menjadi dasar bagi pelajar tingkat Sekolah Menengah dan mahasiswa tingkat pertama. Uraian populer memperkuat pengetahuan terkait Material Teknik yang dipergunakan baik di industri dan kehidupan sehari-hari.

Aditia Nugraha

Mahasiswa Teknik Mesin ITENAS Bandung Angkatan 2017

Buku Pengantar Material Teknik ini sangat membantu dalam dunia perkuliahan, karena buku ini memiliki materi yang mudah untuk dimengerti dan dipelajari.

Hemi Soefihandini

Mahasiswa Teknik Mesin Universitas Pancasila Jakarta Angkatan 2018

Isi buku Pengantar Material Teknik ini cukup jelas dan mudah dipahami. Buku ini memuat informasi mengenai ilmu material secara umum, mencakup atom, molekul, dan ikatan antaratom. Setelah pemahaman dasar tersebut, berbagai macam material, meliputi logam (fero dan non-fero), polimer (plastik), keramik dan komposit, yang dibahas mendalam. Harapan dari buku ini semoga lebih banyak lagi materi-materi yang belum ada untuk dipelajari kedepannya.

Dr. Ir. Dwi Rahmalina, M.T.

*Wakil Dekan II Fakultas Teknik Universitas Pancasila
Dosen Teknik Mesin Universitas Pancasila, Jakarta*

Buku Pengantar Material Teknik karangan Prof. Bondan telah menjadi buku pegangan bagi mahasiswa Program Studi Teknik Mesin S1 Fakultas Teknik Universitas Pancasila sejak diterbitkan, khususnya bagi mahasiswa peserta mata kuliah Material Teknik 1 dan Material Teknik 2. Secara sistematis dan jelas, buku ini membekali mahasiswa mengenai ilmu material secara umum, mencakup struktur atom; sifat mekanis material; sifat, aplikasi, dan pemrosesan logam ferrous dan non-ferrous; mekanisme penguatan logam; serta sifat, aplikasi, dan pemrosesan polimer, membuat mahasiswa dapat meningkatkan pemahaman terkait materi yang dibahas. Selamat kepada penulis, hadirnya buku ini telah memberikan kontribusi positif dalam peningkatan pengetahuan di bidang material teknik di Indonesia. Semoga penulis dapat terus melahirkan karya-karya berikutnya di bidang material teknik.

Dr. M. Syahid, S.T., M.T.

Dosen Teknik Mesin Universitas Hassanudin, Makassar

Buku Pengantar Material Teknik ditulis dengan sistematis dan menggunakan bahasa yang mudah dipahami, sehingga sangat direkomendasikan bagi mahasiswa yang baru berkenalan dengan dunia material. Baik mahasiswa teknik material, teknik mesin, atau mahasiswa teknik lainnya.

Risly Wijanarko, S.T.

*Alumni Teknik Metalurgi dan Material
Universitas Indonesia Angkatan 2014*

Pemilik Kaya Leathers

Buku sakti untuk mahasiswa Teknik Metalurgi dan Material tahun pertama! Bahasa yang digunakan sangat mudah dipahami dan jelas. Bersyukur sekali ada buku PMT (Pengantar Material Teknik) ini.

Dr. Imam Basori, M.T.

Dosen Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta

Buku Pengantar Material Teknik edisi 1 menggunakan bahasa yang lugas, sangat mudah dipelajari dan dipahami. Semoga di edisi kedua ini lebih banyak memberikan manfaat untuk masyarakat, khususnya mahasiswa. Barakallah...

,

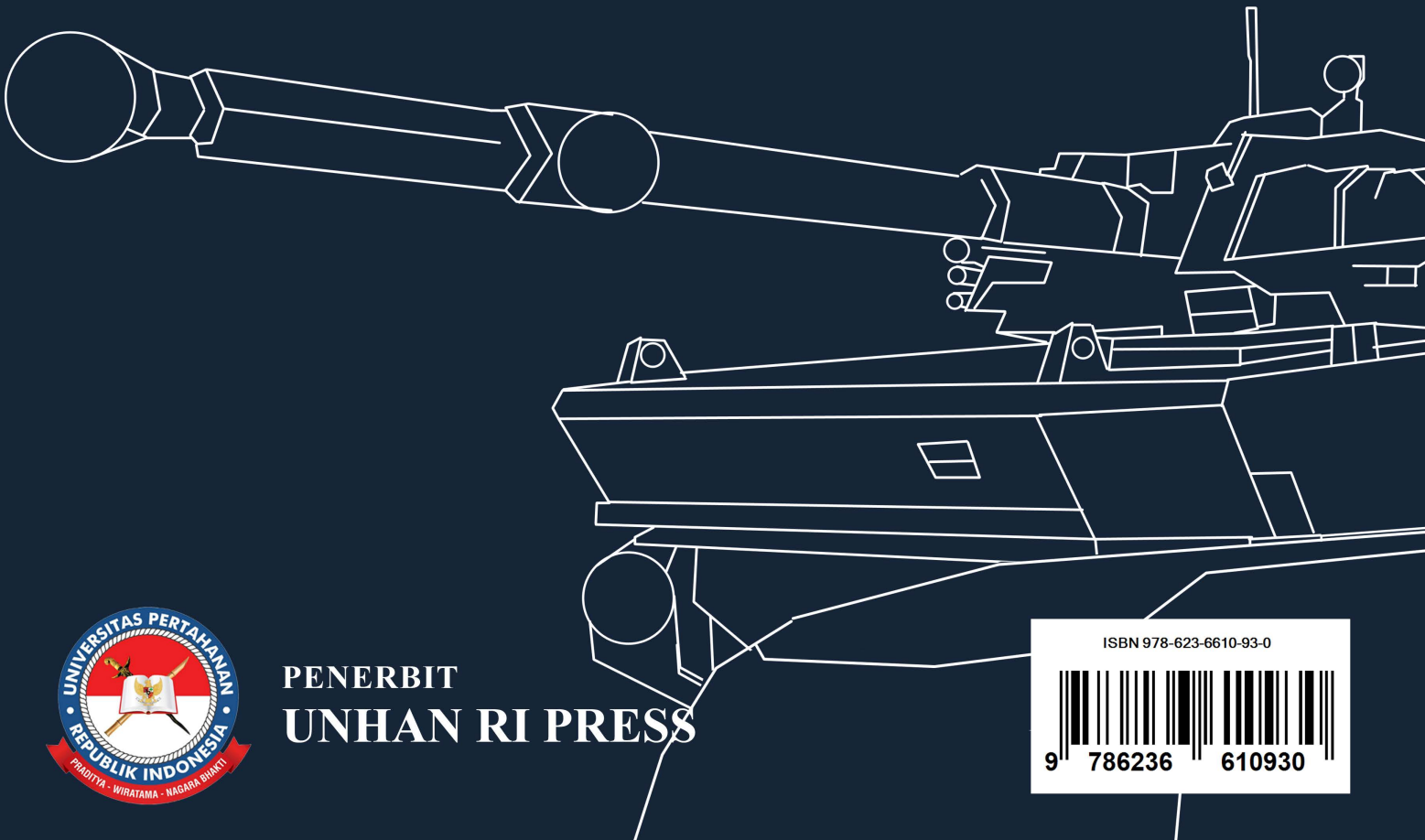
Sebuah buku pegangan bagi mahasiswa Fakultas Teknik dan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, serta mahasiswa Politeknik pada umumnya. Buku ini sudah menjadi obsesi penulis sejak lama, utamanya karena tidak banyak buku sejenis yang tersedia dalam Bahasa Indonesia. Mahasiswa teknik seluruh jurusan/prodi, khususnya mahasiswa tahun pertama yang sedang mempelajari Material Teknik/Pengetahuan Bahan dapat menggunakan buku Pengantar Material Teknik ini.

Buku ini memberikan pembahasan mengenai Material Teknik yang meliputi: struktur material, sifat material, pemrosesan material dan kinerja material dalam berbagai aplikasi. Terkait struktur material, terdapat pembahasan tentang struktur atom dan ikatan antar-atom. Tentang sifat material, dibahas secara rinci mengenai sifat mekanik, dan secara umum tentang sifat fisik maupun sifat kimia serta teknik pengujiannya. Untuk pemrosesan material, diberikan teknik fabrikasi logam serta pemrosesan polimer dan keramik. Juga dibahas tentang material komposit.

Sebagai suatu pedagogi, serta untuk memfokuskan pembelajaran dan mengetahui kompetensi yang ingin dicapai, tujuan instruksional diberikan di setiap awal bab. Untuk memeriksa capaian pembelajaran, di akhir setiap bab diberikan soal-soal latihan.

Materi yang dibahas dalam buku ini mencakup:

- | | | |
|------------|-----------|---|
| Bab | 1 | Material |
| Bab | 2 | Struktur Atom dan Ikatan Antar Atom |
| Bab | 3 | Sifat Material |
| Bab | 4 | Sifat, Aplikasi dan Pemrosesan Logam Fero |
| Bab | 5 | Sifat, Aplikasi dan Pemrosesan Logam Non-Fero |
| Bab | 6 | Pembentukan dan Perlakuan Panas Logam |
| Bab | 7 | Mekanisme Penguatan pada Logam |
| Bab | 8 | Sifat, Aplikasi dan Pemrosesan Polimer |
| Bab | 9 | Sifat, Aplikasi dan Pemrosesan Keramik |
| Bab | 10 | Sifat, Aplikasi dan Pemrosesan Komposit |
| Bab | 11 | Kumpulan Soal Komprehensif |



PENERBIT
UNHAN RI PRESS

ISBN 978-623-6610-93-0

