

BAB IX

LOGAM NON-FEROUS

Sifat-sifat serta struktur kelompok logam non-besi yang berbeda akan mempunyai harga yang jauh berbeda. Contohnya, temperatur leleh, bervariasi dari temperatur ruang untuk logam galium hingga lebih dari 3000^oC untuk wolfram. Kekuatan bervariasi mulai dari 5 MN.m⁻² hingga lebih dari 1.500 MN/m². Aluminium, magnesium dan beryllium (logam ringan) mempunyai kerapatan yang sangat rendah, sedangkan timbal dan wolfram mempunyai kerapatan yang sangat tinggi.

Pada banyak aplikasi, berat merupakan faktor yang kritis. Untuk menghubungkan kekuatan material dengan beratnya, yang dikenal dengan kekuatan spesifik atau rasio kekuatan terhadap berat, didefinisikan dengan:

$$\text{Kekuatan spesifik} = \frac{\text{kekuatan}}{\text{kerapatan}}$$

Tabel 1 menampilkan perbandingan kekuatan spesifik dari beberapa paduan non-besi kekuatan tinggi.

Faktor lainnya dalam desain yang berkaitan dengan logam non-besi adalah biaya, yang juga bisa berbeda dengan sangat berarti.

Tabel 1. Kekuatan spesifik paduan non-besi.

<i>Logam</i>	<i>Kerapatan (Mg.m⁻³)</i>	<i>Kekuatan Tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan Tarik Spesifik (m²s⁻²)</i>
Aluminium	2,70	570	211000
Beryllium	1,85	380	205000
Tembaga	8,93	1300	146000
Timbal	11,36	70	6000
Magnesium	1,74	380	218000
Nikel	8,90	1360	153000
Titanium	4,51	1350	299000
Wolfram	19,25	1030	54000
Seng	7,13	520	73000
Besi	7,87	2070	263000

PADUAN ALUMINIUM

Aluminium adalah logam kedua terbanyak di bumi. Aluminium digunakan di jutaan aplikasi, diantaranya kaleng minuman, alat rumah tangga, peralatan pemrosesan kimia, peralatan transmisi daya listrik, komponen otomotif dan komponen pesawat ruang angkasa.

Sifat-sifat Aluminium

Aluminium mempunyai kerapatan $2,70 \text{ Mg.m}^{-3}$ atau sepertiga kerapatan baja, dan modulus elastisitas sebesar 70 GN.m^{-2} . Walaupun paduan aluminium mempunyai sifat tarik yang rendah bila dibandingkan dengan baja, kekuatan spesifiknya sangat baik. Aluminium sering digunakan ketika berat merupakan faktor penting, seperti di pesawat terbang dan otomotif.

Aluminium juga bisa berespon terhadap mekanisme penguatan. Tabel 2 membandingkan kekuatan aluminium dianil murni dengan paduan aluminium yang diperkuat dengan berbagai teknik. Paduan aluminium bisa mempunyai kekuatan 30 kali lebih besar dari aluminium murni.

Tabel 2. Efek mekanisme penguatan pada aluminium dan paduan aluminium.

<i>Material</i>	<i>Kekuatan tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan luluh (MN.m⁻²)</i>	<i>% elongasi</i>	<i>Kekuatan luluh(paduan)</i>
				<i>Kekuatan luluh(murni)</i>
Al murni (99,999% Al)	45	17	60	
Al murni komersial (99% Al)	90	35	45	2,0
Paduan Al diperkuat larutan-jenuh (Al, 1,2% Mn)	110	41	35	2,4
Al diperkuat 75% pengerjaan dingin (99% I)	165	152	15	8,8
Paduan Al diperkuat dispersi (Al, 5% Mg)	290	152	35	8,8
Paduan Al diperkeras penuaan (aging) (Al, 5,6% Zn, 2,5% Mg)	572	503	11	29,2

Sifat fisik yang menguntungkan dari aluminium diantaranya konduktivitas listrik dan termal, sifat nonmagnetik (para magnetik) dan ketahanan yang baik terhadap oksidasi dan korosi. Aluminium akan bereaksi dengan oksigen, bahkan pada temperatur ruang, membentuk lapisan sangat tipis aluminium oksida (Al_2O_3) yang akan melindungi lapisan dibawahnya dari lingkungan yang korosif.

Aluminium tidak menunjukkan batas fatigue yang tinggi, sehingga kerusakan bisa terjadi pada tegangan rendah. Karena temperatur lelehnya yang rendah, aluminium

tidak cocok digunakan pada temperatur tinggi. Terakhir, paduan aluminium mempunyai kekerasan rendah, sehingga mengakibatkan tahanan aus yang rendah.

Contoh soal

Kabel baja berdiameter 12,5 mm mempunyai kekuatan luluh 310 MN/m². Kerapatan baja kira-kira 7,87 Mg/m³. Berdasarkan data pada tabel 5, carilah: (a) beban maksimum yang bisa ditahan oleh kabel baja. (b) Diameter paduan aluminium-manganes(3004-H18) yang diperlukan untuk menahan beban yang sama dengan baja, dan (c) berat kabel baja per meter versus kabel paduan aluminium.

Jawab

a. Beban = $F = \sigma_y A = 310 (\pi/4) (0,0125)^2 = 0,038 \text{ MN} = 38 \text{ kN}$

b. Kekuatan luluh paduan aluminium adalah 250 MN/m², sehingga:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{F}{\sigma_y} = \frac{0,038}{250} = 1,52 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$d = 0,0139 \text{ m} = 13,9 \text{ mm}$$

c. Kerapatan baja = $\rho = 7,87 \text{ Mg/m}^3$

kerapatan aluminium = $\rho = 2,70 \text{ Mg/m}^3$

$$\text{Berat 1 m baja} = A/\rho = \frac{\pi}{4} (0,0125)^2 (1) (7,87) = 9,66 \times 10^{-4} \text{ Mg} = 0,966 \text{ kg}$$

$$\text{Berat 1 m aluminium} = A/\rho = \frac{\pi}{4} (0,0139)^2 (1) (2,70) = 4 \times 10^{-4} \text{ Mg} = 0,410 \text{ kg}$$

Walaupun kekuatan luluh aluminium lebih rendah dari baja dan diameter kabelnya berukuran lebih besar, berat kabel aluminium kurang dari setengah berat kabel baja.

Penandaan

Paduan aluminium bisa dibagi atas dua kelompok utama: paduan tempa dan cor, tergantung kepada metode pabrikasinya. Paduan tempa, yang dibentuk dengan deformasi plastis (pengerjaan panas atau dingin), mempunyai komposisi dan struktur mikro yang berbeda sekali dengan paduan cor. Disetiap kelompok utama, paduan dikelompokkan atas dua subkelompok: paduan yang bisa diberi perlakuan panas (heat-treatable) dan yang tidak bisa diberi perlakuan panas (nonheat-treatable).

Paduan aluminium diberi tanda dengan sistem penomoran seperti yang ditunjukkan oleh tabel 3. Nomor pertama menunjukkan unsur pepadu utama, dan nomor selanjutnya mengacu kepada komposisi spesifik paduan. Sistem penomoran IADS ini (International Alloy Designation System) telah banyak diadopsi oleh berbagai negara.

Tabel 3. Sistem Penandaan IADS (International Alloy Designation System) untuk paduan aluminium.

Paduan Tempa :

1xxx	Al murni komersial (>99% Al)	Tidak bisa di <i>aging</i>
2xxx	Al-Cu dan Al-Cu-Li	Bisa di <i>aging</i>
3xxx	Al-Mn	Tidak bisa di <i>aging</i>
4xxx	Al-Si dan Al-Mg-Si	Bisa di <i>aging</i> jika mengandung Mg
5xxx	Al-Mg	Tidak bisa di <i>aging</i>
6xxx	Al-Mg-Si	Bisa di <i>aging</i>
7xxx	Al-Mg-Zn	Bisa di <i>aging</i>
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, B, Fe atau Cr	Sebagian besar bisa di <i>aging</i>

Paduan Cor :

1xx	Al murni komersial	Tidak bisa di <i>aging</i>
2xx	Al-Cu	Bisa di <i>aging</i>
3xx	Al-Si-Cu atau Al-Mg-Si	Beberapa bisa di <i>aging</i>
4xx	Al-Si	Tidak bisa di <i>aging</i>
5xx	Al-Mg	Tidak bisa di <i>aging</i>
7xx	Al-Mg-Zn	Bisa di <i>aging</i>
8xx	Al-Sn	Bisa di <i>aging</i>

Derajat penguatan diberikan oleh penandaan temper T atau H, tergantung apakah paduan di beri perlakuan panas atau pengerasan regangan (tabel 4). Penandaan lainnya adalah apakah paduan dianil (O), perlakuan larutan (W) atau digunakan seperti kondisi pabrikasi (F). Angka yang mengikuti T atau H menunjukkan jumlah pengerasan regangan, jenis perlakuan panas, atau aspek khusus lainnya pada pemrosesan paduan. Paduan yang umum dan sifat-sifatnya ditunjukkan oleh tabel 5.

Tabel 4. Penandaan temper paduan aluminium.

F	Sebagaimana pabrikasi (pengerjaan panas, tempa, cor dsb.
O	Dianil (pada kondisi paling lunak yang mungkin)
H	Pengerjaan dingin
	H1x – hanya pengerjaan dingin. (x merupakan jumlah pengerjaan dingin dan penguatan
	H12 – pengerjaan dingin yang memberikan kekuatan tarik ditengah-tengah antara temper O dan H14.
	H14 - pengerjaan dingin yang memberikan kekuatan tarik ditengah-tengah antara temper O dan H18.
	H16 - pengerjaan dingin yang memberikan kekuatan tarik ditengah-tengah antara temper H14 dan H18.
	H18 – pengerjaan dingin yang memberikan kira-kira 75% reduksi.
	H19 – pengerjaan dingin yang memberikan kekuatan tarik minimal 15 MN.m-2 lebih besar dari yang diperoleh oleh temper H18.
	H2x – pengerjaan dingin dan sebagian dianil.
	H3x – pengerjaan dingin dan distabilkan pada temperatur rendah untruk mencegah pengerasan penuaan (<i>aging</i>) pada struktur.
W	Perlakuan larutan

- T Pengerasan penuaan
 T1 – didinginkan dari suhu pabrikasi dan *diaging* secara alami
 T2 – didinginkan dari suhu pabrikasi, pengerjaan dingin dan *diaging* secara alami
 T3 – perlakuan larutan, pengerjaan dingin, dan *diaging* secara alami
 T4 - perlakuan larutan, dan *diaging* secara alami
 T5 – didinginkan dari suhu pabrikasi dan *diaging* secara artifisial.
 T6 - perlakuan larutan, dan *diaging* secara artifisial.
 T7 - perlakuan larutan dan distabilkan dengan *overaging*.
 T8 - perlakuan larutan, pengerjaan dingin, dan *diaging* secara artifisial.
 T9 - perlakuan larutan, *diaging* secara artifisial, dan pengerjaan dingin.
 T10 – didinginkan dari suhu pabrikasi, pengerjaan dingin dan *diaging* secara artifisial.

Tabel 5. Sifat-sifat umum paduan aluminium

<i>Paduan</i>		<i>Kekuatan Tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan Luluh (MN.m⁻²)</i>	<i>% Elongasi</i>	<i>Aplikasi</i>
Paduan tempa nonheat-treatable					
1100-O	>99% Al	90	35	40	} Komponen listrik, foil Proses makanan
1100-H18		165	150	10	
3004-O	1,2% Mn-1,0% Mg	180	70	25	} Kaleng minuman, penggunaan arsitek
3004-H18		285	250	9	
4043-O	5,2% Si	145	70	22	} Logam pengisi las
4043-H18		285	270	1	
5182-O	4,5% Mg	290	130	25	} Tutup kaleng minuman Komponen kapal
5182-H19		420	395	4	
Paduan tempa heat-treatable					
2024-T4	4,4% Cu	470	325	20	Roda truk
2090-T6	2,4% Li-2,7% Cu	550	517	6	Kulit pesawat udara
4032-T6	12% Si-1% Mg	380	30	9	Piston
6061-T6	1% Mg-0,6% Si	310	275	15	Cano, gerbon kereta api
7075-T6	5,6% Zn-2,5% Mg	570	505	11	Rangka pesawat udara
Paduan cor					
201-T6	4,5% Cu	485	435	7	Rumah transmisi
319-F	6% Si-3,5% Cu	185	125	2	Pengecoran umum
356-T6	7% Si-0,3% Mg	230	165	3	Fitting pesawat udara
380-F	8,5% Si-3,5% Cu	315	160	3	Rumah motor
390-F	17% Si-4,5% Cu	285	240	1	Mesin otomotif
443-F	5,2% Si (cor pasir)	130	55	8	Peralatan penanganan makanan, fitting kapal
	mould permanen	160	60	10	
	die cast	230	110	9	

Paduan Tempa. Paduan tempa 1xxx, 3xxx, 5xxx dan sebagian besar 4xxx tidak bisa diberi perlakuan panas. Paduan 1xxx dan 3xxx adalah paduan fasa tunggal, kecuali ada sejumlah kecil inklusi atau senyawa antar logam (Gambar 13.2). Sifat-sifat paduan ini dikontrol oleh pengerasan regangan, penguatan larutan jenuh dan pengontrolan besar

butir. Namun kelarutan elemen pepadu pada aluminium rendah pada temperatur ruang, maka derajat penguatan larutan jenuh terbatas.

Paduan Cor. Banyak paduan cor aluminium yang ditunjukkan oleh tabel 5 mengandung cukup silikon untuk menyebabkan reaksi eutektik, sehingga membuat paduan mempunyai titik leleh rendah, fluiditas baik, dan kemampuan cor yang baik. Fluiditas adalah kemampuan logam cair untuk mengalir melalui cetakan tanpa pembekuan lebih awal, dan kemampuan cor adalah berhubungan dengan kemudahan dimana benda cor yang baik bisa dibuat dari paduan.

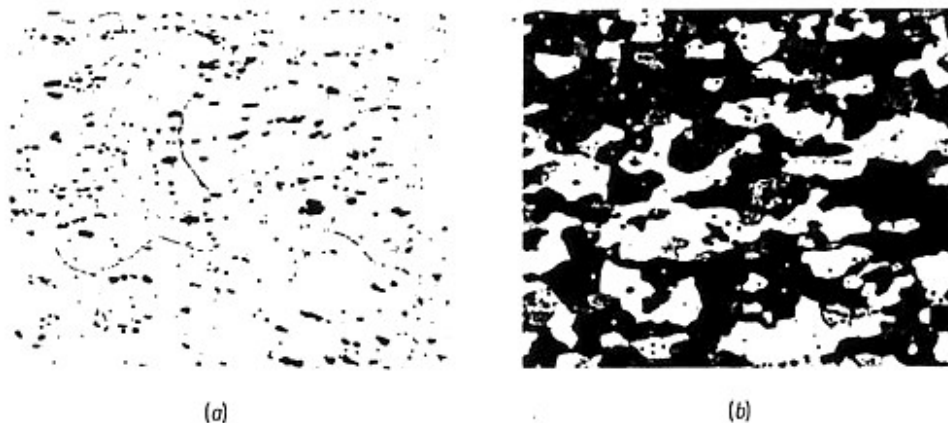


Figure 13.2
(a) FeAl_3 inclusions in annealed 1100 aluminium ($\times 350$). (b) Mg_2Si precipitates in annealed 5457 aluminium alloy ($\times 75$). (From Metals Handbook, Vol. 7, 8th Ed., American Society for Metals, 1972.)

Paduan Aluminium Lanjut. Sejumlah peningkatan terhadap paduan aluminium konvensional dan metode pabrikasi telah meningkatkan kegunaan logam ini. Paduan yang mengandung litium telah dibuat, khususnya untuk industri pesawat udara. Litium mempunyai kerapatan $0,534 \text{ Mg/m}^3$, sehingga kerapatan paduan Al-Li 10% lebih kecil dari paduan aluminium konvensional (Gambar 13.5). Modulus elastisitas meningkat, dan kekuatan bisa sama atau melebihi paduan konvensional (lihat paduan 2090 pada tabel 5). Kerapatan yang rendah membuat kekuatan spesifik sangat bagus sekali dan peningkatan kekakuan spesifik lebih besar sehingga membuat paduan ini sangat disukai dalam penggunaan struktur pesawat udara. Paduan ini mempunyai laju pertumbuhan retak fatigue rendah, sehingga meningkatkan ketahanan fatigue, dan mempunyai ketangguhan yang baik pada temperatur *kriogenik*. Al-Li juga digunakan pada rantai, kulit dan rangka pesawat militer dan komersial.

Kekuatan tinggi paduan Al-Li adalah akibat pengersan penuaan (Gambar 13.6). Paduan yang mengandung sampai 2,5% Li bisa diberi perlakuan panas dengan metode

konvensional. Penambahan Li (hingga 4%) bisa dilakukan dengan proses pembekuan cepat, yang akan menurunkan berat paduan dan menaikkan kekuatan.

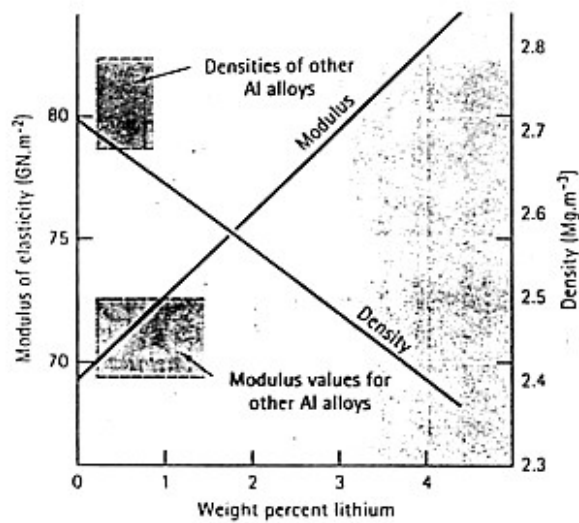


Figure 13.5
The effect of lithium on the stiffness and density of aluminium alloys.

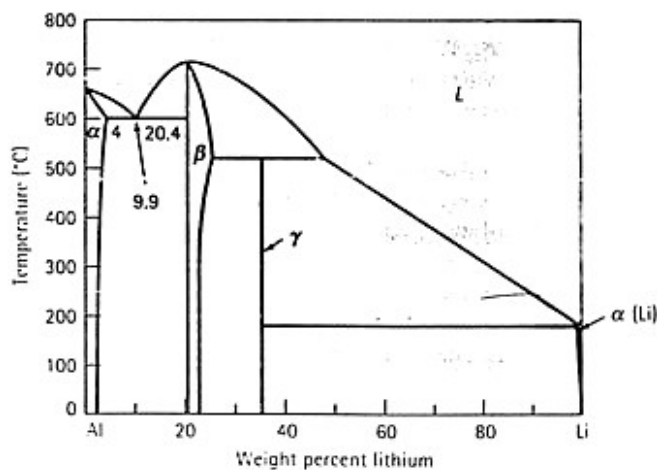


Figure 13.6
The aluminium-lithium phase diagram.

Contoh soal

Pilihlah metode untuk daur ulang paduan aluminium yang digunakan untuk kaleng minuman.

Jawab

Daur ulang aluminium memiliki keuntungan sebab diperlukan energi yang kecil untuk membuat aluminium dari Al_2O_3 . Namun mendaur ulang kaleng minuman mempunyai beberapa kesulitan.

Kaleng minuman terbuat dari dua paduan aluminium yang mempunyai perbedaan komposisi (tabel 5) (3004 untuk bagian badannya, dan 5182 untuk penutupnya). Paduan 3004 mempunyai mampu bentuk yang baik untuk proses tarikan. Paduan 5182

lebih keras dan membuat tarian ke atas dapat berfungsi dengan baik. Ketika kaleng dicairkan, paduan hasilnya mengandung Mg dan Mn dan tidak cocok untuk aplikasi apapun.

Satu pendekatan untuk mendaur ulang kaleng adalah dengan kedua bahan kaleng ini. Kaleng dirobek, kemudian dipanaskan untuk membuang lapisan pernis yang berfungsi melindungi kaleng selama pemakaian. Kita bisa selanjutnya merobek bahan pada temperatur dimana paduan 5182 mulai mencair. Paduan 5182 mempunyai jangkauan pembekuan yang lebih lebar dari paduan 3004 dan pecah menjadi potongan-potongan kecil. Paduan 3004 lebih ulet dan robek dalam ukuran yang lebih besar. Kepingan paduan 5182 dapat dipisahkan dengan melewatkannya melalui sarinan. Kedua paduan yang sudah terpisah kemudian dilebur, dicor dan dirol ke bentuk kaleng yang baru.

Metode alternatif adalah dengan melumerkan kaleng. Ketika kaleng sudah cair, kita alirkan klorida ke cairan paduan. Klorine akan bereaksi dengan magnesium, dan melepaskannya dalam bentuk klorida. Cairan sisa dapat diatur komposisinya dan didaur ulang menjadi paduan 3004.

PADUAN MAGNESIUM

Magnesium, dimana sering diekstraksi secara elektrolitik dari magnesium klorida yang terkonsentrasi di air laut, adalah lebih ringan dari aluminium, dengan kerapatan $1,74 \text{ Mg/m}^3$, dan meleleh pada temperatur sedikit lebih rendah dari aluminium (650°C). Di banyak lingkungan, tahanan korosi magnesium mendekati aluminium, namun jika berada di lingkungan yang mengandung garam, seperti dekat laut, akan menyebabkan penguraian yang cepat. Walaupun paduan magnesium tidak sekuat paduan aluminium, kekuatan spesifiknya hampir sama. Oleh sebab itu paduan magnesium digunakan di aplikasi pesawat udara, mesin kecepatan tinggi, peralatan transportasi dan peralatan penanganan material.

Magnesium mempunyai modulus elastisitas rendah (45 GN/m^2) dan ketahanan fatigue, creep dan aus yang rendah. Magnesium juga berbahaya selama pekerjaan pengecoran atau pemesinan, karena bisa bereaksi dengan mudah dengan oksigen dan terbakar. Respon magnesium terhadap mekanisme kekuatan juga rendah.

Struktur dan Sifat. Magnesium murni mempunyai struktur HCP dan keuletannya lebih rendah dari aluminium. Namun paduan magnesium mempunyai keuletan karena unsur padu meningkatkan jumlah bidang *slip* aktif. Beberapa deformasi dan pengerasan regangan bisa dilakukan pada temperatur ruang, dan paduan bisa dideformasi pada suhu tinggi. Pengerasan regangan menghasilkan pengaruh yang

relatif kecil pada magnesium murni karena koefisien pengerasan regangan yang rendah.

Sebagaimana pada paduan aluminium, kelarutan elemen pepadu pada magnesium pada temperatur ruang terbatas, menyebabkan hanya sejumlah kecil derajat penguatan larutan jenuh. Namun kelarutan banyak elemen pepadu meningkat terhadap temperatur, sebagaimana terlihat pada diagram fasa Mg-Al (gambar 13.8). Karenanya paduan bisa diperkuat dengan penguatan dispersi atau pengerasan penuaan. Beberapa paduan magnesium pengerasan penuaan, seperti paduan yang mengandung elemen Zr, Th, Ag, atau Ce, mempunyai ketahanan yang baik terhadap *overageing* pada temperatur sampai 300°C. Paduan yang mengandung hingga 9% Li mempunyai berat yang sangat ringan. Sifat-sifat paduan magnesium ditabulasikan di tabel 6. Sistem penomoran dibuat oleh "American Society for Testing Materials" (ASTM) dan telah diadopsi oleh banyak negara.

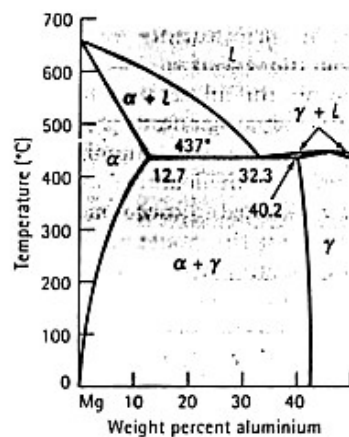


Figure 13.8
The magnesium-aluminium phase diagram.

Tabel 6. Sifat-sifat paduan magnesium pada umumnya.

<i>Paduan (Penomoran ASTM)</i>	<i>Komposisi</i>	<i>Kekuatan Tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan Luluh (MN.m⁻²)</i>	<i>% Elongasi</i>
Mg Murni:				
Dianil		160	90	3-15
Pengerjaan dingin		180	115	2-10
Paduan Cor:				
AM100-T6	10% Al-0,1% Mn	275	150	1
AZ81A-T4	7,6% Al-0,7% Zn	275	85	15
ZK61A-T6	6% Zn-0,7% Zr	310	195	10
Paduan Tempa:				
AZ80A-T5	8,5% Al-0,5% Zn	380	25	7
ZK40A-T5	4% Zn-0,45% Zr	275	255	4
HK31A-H24	3% Th-0,6% Zr	260	205	8

Paduan magnesium lanjut termasuk diantaranya paduan dengan impuritas rendah dan paduan yang mengandung sejumlah besar (>5%) cerium dan unsur bumi jarang lainnya. Paduan ini membentuk lapisan tipis pelindung MgO yang meningkatkan ketahanan korosi. Proses pembekuan yang cepat akan bisa membuat penyerapan elemen pemadu lebih banyak ke magnesium, sehingga akan meningkatkan tahanan korosi. Peningkatan kekuatan, terutama pada temperatur tinggi, bisa didapatkan dengan memasukkan partikel keramik atau serat seperti silikon karbida ke dalam logam.

PADUAN TEMBAGA

Paduan berbasis tembaga lebih berat dari besi. Walaupun kekuatan luluh beberapa paduan tinggi, kekuatan spesifiknya umumnya lebih rendah dari paduan aluminium atau magnesium. Paduan mempunyai ketahanan fatigue, creep dan aus lebih baik dari paduan ringan aluminium atau magnesium. Banyak paduan mempunyai keuletan, ketahanan korosi dan konduktivitas listrik dan termal yang baik dan sebagian besar bisa disambung atau dipabrikasi kedalam bentuk yang berguna. Aplikasi paduan berbasis tembaga antara lain: komponen listrik (seperti kabel), pompa, katup, dan komponen *plumbing*.

Paduan tembaga juga tidak seperti logam biasa dimana paduan ini bisa dipilih untuk menghasilkan warna dekoratif yang tepat. Tembaga murni berwarna merah, penambahan seng akan menghasilkan warna kuning, dan penambahan nikel menghasilkan warna perak. Paduan tembaga bisa diperkuat dengan semua mekanisme penguatan yang kita kenal. Pengaruh mekanisme penguatan terhadap sifat mekanik bisa dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Sifat-sifat paduan tembaga umum yang diperoleh dengan mekanisme penguatan yang berbeda.

<i>Material</i>	<i>Kekuatan Tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan Luluh (Mn.m⁻²)</i>	<i>% Elongasi</i>	<i>Mekanisme Penguatan</i>
Cu murni, dianil	210	35	60	
Cu murni komersial, Dianil untuk mendapatkan butir kasar	220	70	55	
Cu murni komersial, Dianil untuk mendapatkan butir halus	235	75	55	Ukuran butir
Cu murni komersial, Pengerjaan dingin 70%	395	365	4	Strain hardening
Cu-35%Zn, dianil	325	105	62	Solid solution
Cu-10%Sn, dianil	455	195	68	Solid solution
Cu-35%Zn, pengerjaan dingin	675	435	3	Solid solution +

Cu-2% Be, pengerasan penuaan	1310	1205	4	Strain hardening Age-hardening
Cu-Al di quench dan temper	760	415	5	Martensitic reaction
Perunggu mangan cor	490	195	30	Eutectoid reaction

Tembaga yang mengandung impuritas kurang dari 1% digunakan untuk aplikasi dibidang kelistrikan. Sejumlah kecil cadmium, peral dan Al_2O_3 meningkatkan kekerasan tanpa mempengaruhi konduktivitas dengan berarti. Paduan tembaga fasa tunggal diperkuat dengan pengerjaan dingin. Tembaga FCC mempunyai keuletan yang sangat baik dan koefisien pengerasan regangan yang tinggi.

Paduan Tembaga Timbal. Umumnya paduan tembaga tempa bisa mengandung timbal (Pb) hingga 4,5%. Timbal membentuk reaksi monotektik dengan tembaga dan menghasilkan bola timbal kecil karena paling akhir membeku. Timbal akan menaikkan karakteristik pemesinan. Bahkan jumlah timbal yang lebih besar digunakan pada pengecoran tembaga, dimana timbal memberikan kemampuan pelumasan dan daya rekat, dengan cara partikel keras lekat ke bola timbal lunak, dan karenanya mengurangi keausan.

NIKEL DAN COBALT

Paduan nikel dan cobalt banyak digunakan untuk proteksi karat dan lingkungan temperatur tinggi, karena logam ini mempunyai titik leleh yang tinggi dan kekuatan yang tinggi. Nikel mempunyai struktur kristal FCC dan mempunyai kemampuan pembentukan yang tinggi, cobalt mempunyai struktur FCC diatas $417^{\circ}C$ dan struktur HCP pada temperatur ruang. Paduan nikel dan cobalt umum bisa dilihat pada tabel 8.

Tabel 8. Komposisi, sifat dan aplikasi beberapa paduan nikel dan cobalt.

<i>Material</i>	<i>Kekuatan Tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan Luluh (Mn.m⁻²)</i>	<i>% Elongasi</i>	<i>Mekanisme Penguatan</i>	<i>Aplikasi</i>
Ni murni (99,9% Ni)	345 655	110 620	45 4	Danil Pengerjaan dingin	Corrosion resistance Corrosion resistance
Ni-Cu alloy: Monel 400 (Ni-31,5%Cu)	540	270	37	Danil	Katup, pompa, heat Exchanger
Monel K-500 (Ni-29,5% Cu-2,7%Al-0,6%Ti)	1030	760	30	di-aging	Poros, pegas, Impeller
Ni Superalloy Inconel 600 (Ni-15,5% Cr-8%Fe)	620	200	49	karbida	Peralatan perlakuan Panas

Hastelloy B-2 (Ni-28% Mo)	900	415	61	karbida	Corrosion resistance
DS-Ni (Ni-2% ThO ₂)	490	330	14	dispersi	Turbin gas
Fe-Ni superalloy: Incoloy 800 (Ni-46% Fe- 1%Cr)	615	258	37	karbida	Heat exchanger
Co Superalloy: Stellite 6B (60%Co- 30%Cr-4,5%W)	1220	710	4	karbida	Abrasive wear resistance

Nikel dan Monel. Nikel dan paduannya mempunyai ketahanan korosi dan karakteristik pembentukan yang sangat baik. Jika tembaga ditambahkan kedalam nikel, kekuatan maksimum yang diperoleh mendekati 60% kekuatan Ni. Sejumlah paduan, disebut *monel*, dengan komposisi sekitar angka tersebut karena kekuatan dan ketahanan korosinya digunakan di air asin dan pada temperatur tinggi. Beberapa monel mengandung aluminium dan titanium. Paduan-paduan ini menunjukkan respon pengerasan penuaan dengan presipitasi γ , dimana Ni₃Al atau Ni₃Ti berpresipitasi yang akan menggandakan kekuatan tariknya.

Beberapa sifat khusus bisa didapatkan pada paduan nikel. Nikel bisa digunakan untuk menghasilkan magnet permanen karena sifat ferromagnetiknya. Paduan Ni-36% Fe (Invar) menunjukkan gejala tanpa ekspansi selama pemanasan; efek ini digunakan untuk menghasilkan material komposit bimetal.

Superalloy. Superalloy (paduan super) adalah nikel, besi-nikel, dan paduan cobalt yang mengandung sejumlah besar elemen pemadu yang dimaksudkan untuk menghasilkan kekuatan tinggi pada temperatur tinggi, tahan creep pada temperatur mencapai 1000°C, dan tahan korosi. Sifat yang baik pada temperatur tinggi ini didapatkan walaupun temperatur lelehnya kira-kira sama dengan baja. Aplikasi umum adalah sudu untuk turbin dan mesin jet, heat exchanger, komponen bejana untuk reaksi kimia, dan peralatan perlakuan panas.

Untuk mendapatkan kekuatan tinggi dan ketahanan creep, elemen pemadu harus menghasilkan struktur mikro yang kuat dan stabil pada temperatur tinggi. Penguatan yang umumnya dilakukan adalah penguatan larutan padat, penguatan dispersi dan pengerasan presipitasi.

PADUAN TITANIUM

Titanium mempunyai sifat yang baik pada temperatur tinggi, tahan korosi, dan kekuatan spesifik tinggi. Kekuatannya mencapai 1400 MN/m², dan kerapatan 4,505

Mg/m³. Disamping itu, lapisan pelindung TiO₂ memberikan kekuatan yang baik terhadap korosi dan kontaminasi dibawah suhu 535°C.

Sifat tahan korosi yang baik dimanfaatkan untuk aplikasi di peralatan pemrosesan kimia, komponen kapal, dan implan biomedical. Juga digunakan untuk bahan pesawat udara seperti rangka pesawat dan komponen mesin jet. Jika dikombinasikan dengan niobium, dihasilkan senyawa *superconductive intermetallic*. Titanium juga sering dikombinasikan dengan nikel atau aluminium.

Titanium Murni Komersial. Titanium tanpa paduan digunakan dalam hal ketahanan korosinya. Impuritas, seperti oksigen meningkatkan kekuatan titanium tetapi menurunkan ketahanan korosinya. Penggunaannya meliputi: heat exchanger, pipa, reaktor, pompa dan katup untuk industri kimia dan petrokimia.

Paduan Titanium Alpha. Paduan umum paduan alpha mengandung 5% Al dan 2,5% Sn. Paduan alpha yang dianil ke temperatur tinggi di daerah β , pendinginan cepat akan menghasilkan struktur butir α Widmanstatten dan menghasilkan ketahanan yang baik terhadap fatigue. Pendinginan di dapur akan menghasilkan struktur α seperti pelat yang memberikan ketahanan yang elbih baik terhadap creep.

Paduan Titanium Beta. Walaupun penambahan sejumlah besar vanadium atau molybdenum akan menghasilkan struktur β secara keseluruhan pada temperatur ruang, tidak ada paduan beta yang memadu pada kondisi ini. Namun sebenarnya paduan ini kaya akan *stabilizer* β , sehingga pendinginan cepat akan menghasilkan struktur meta stabil yang terdiri semuanya dari β . Penguatan diperoleh dengan sejumlah besar elemen pemadu penguatan larutan jenuh dan dengan proses penuaan (aging) sturuktur β meta stabil yang akan membentuk presipitasi alpha. Aplikasi logam ini antara lain: *fastener* kekuatan tinggi, *beam*, dan *fitting* untuk penggunaan di pesawat antariksa.

Paduan Titanium Alpha-Beta. Dengan keseimbangan yang tepat dari *stabilizer* α dan β , campuran α dan β diperoleh pada temperatur ruang. Ti-6% Al-4% V adalah contohnya. Karena paduan mengandung dua fasa, perlakuan panas bisa digunakan untuk mengontrol struktur mikro dan sifat-sifatnya.

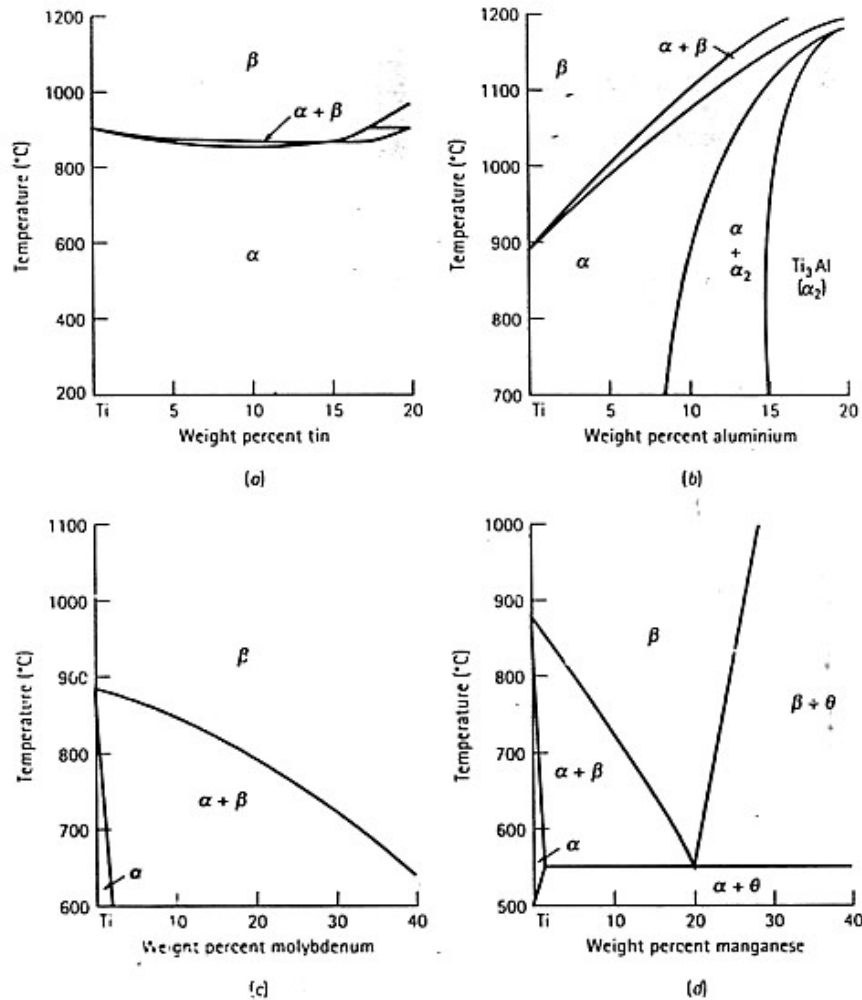


Figure 13.15
Portions of the phase diagrams for (a) titanium-tin, (b) titanium-aluminium, (c) titanium-molybdenum, and (d) titanium-manganese.

Proses anil akan memberikan keuletan tinggi, sifat yang seragam dan kekuatan yang baik. Paduan dipanaskan sedikit dibawah garis temperatur β , menghasilkan sejumlah kecil α yang tak berubah dan mencegah pertumbuhan butir (gambar 13.18). Pendinginan lambat akan menghasilkan butir α *equiaxed*; dimana struktur *equiaxed* akan memberikan sifat keuletan yang baik dan kemampu bentukan sehingga sulit bagi retak fatigue untuk terbentuk. Pendinginan cepat akan menghasilkan fasa alpha berbentuk tenunan keranjang (basketweave) (gambar 13.18c). Kondisi ini akan menghasilkan laju pertumbuhan retak fatigue yang lambat, ketangguhan patah yang baik dan ketahanan yang baik terhadap creep.

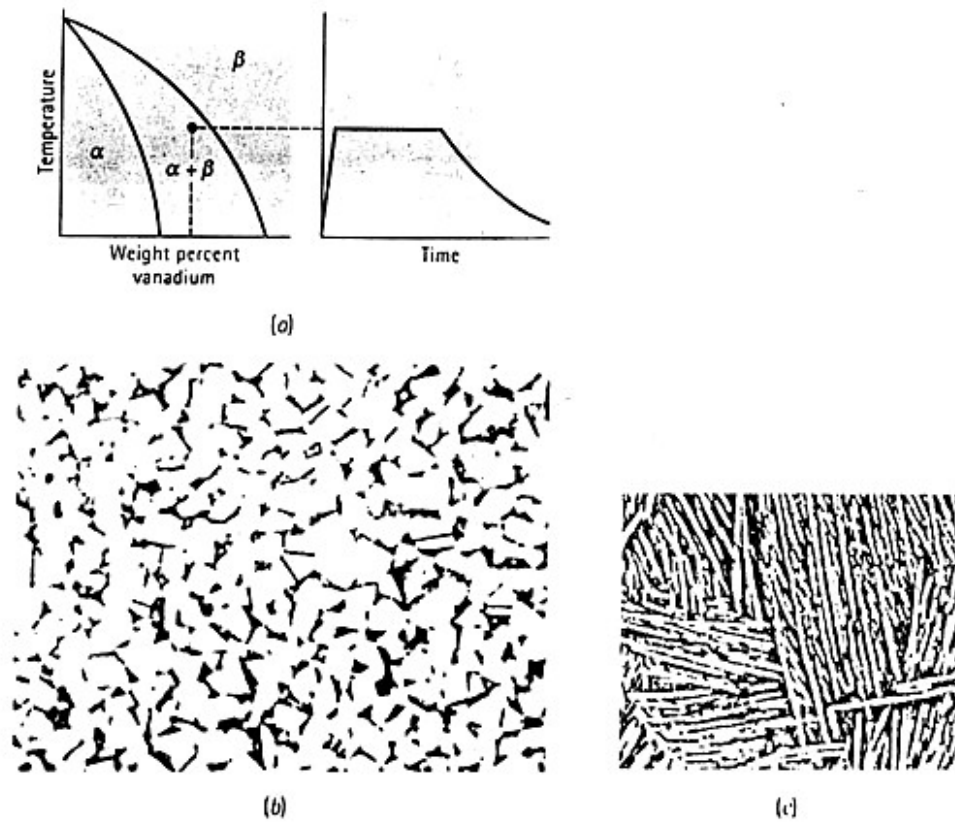


Figure 13.18
 Annealing of an alpha-beta titanium alloy. (a) Annealing is done just below the α - β transus temperature, (b) slow cooling gives equiaxed α grains ($\times 250$), and (c) rapid cooling yields acicular α grains ($\times 2500$).
 (From Metals Handbook, Vol. 7, 8th Ed., American Society for Metals, 1972.)

Soal-soal

1. Jelaskan kenapa paduan aluminium yang mengandung Mg lebih dari 15% tidak digunakan.
2. Perkirakanlah kekuatan tarik yang diharapkan dari paduan aluminium berikut:
a. 1100-H14 b. 5182-H12 c. 3004-H16
3. Sebuah batang dengan panjang 10 m dan diameter 5 mm boleh berdeformasi tidak lebih dari 2 mm karena beban. Berapakah gaya maksimum yang dapat diberikan jika batang terbuat dari:
a. Aluminium.
b. Magnesium.
c. Beryllium.
4. Misalkan batang berpenampang bundar dengan panjang 600 mm menahan beban 1,8 kN tanpa mengalami deformasi permanen. Hitunglah diameter minimum batang jika batang terbuat dari:
a. AZ80A-T5 paduan magnesium, dan
b. 6061-T6 paduan aluminium.
Hitunglah berat batang (berdasarkan Al dan Mg murni) untuk setiap kasus.
5. Apakah paduan aluminium 2024-T9 lebih kuat atau lebih lemah dari paduan 2024-T6? Jelaskan.