

Pemilihan Bahan dan Proses

FT Unkris

Teknik Mesin

Dosen : Ajat Zatmika,ST,MT

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
PENGANTAR MATERI KULIAH.....	1
1.1 Pengertian Desain.....	1
1.2 Evolusi Material	1
1.3 Studi Kasus: Evolusi Material dalam Penyedot Debu.....	2
1.4 Ringkasan dan Kesimpulan	3
PROSES DESAIN	4
2.1 Review Pemilihan Material	4
2.2 Proses Desain	5
2.3 Tipe Desain	6
2.4 Alat Desain dan Data Material	7
2.5 Fungsi, Material, Bentuk, dan Proses.....	8
2.6 Studi Kasus.....	8
MATERIAL TEKNIK DAN SIFAT-SIFATNYA	12
3.1 Kelompok Material Teknik	12
3.2 Pengertian Sifat Material.....	13
3.2.1 Sifat-Sifat Mekanis.....	13
3.2.2 Sifat-Sifat Termal.....	18
3.2.3 Sifat-Sifat Elektrik	19
3.2.4 Sifat-Sifat Optik	20
3.2.5 Sifat-Sifat Eco	20
3.2.6 Ketahanan Lingkungan	21
3.3 Diagram Sifat Material.....	21
3.3.1 Diagram Modulus-Densitas	22
3.3.2 Diagram Kekuatan-Densitas	23
3.3.3 Diagram Modulus-Kekuatan.....	24
DASAR-DASAR PEMILIHAN MATERIAL.....	25
4.1 Pengantar	25
4.2 Strategi Pemilihan Material.....	25
4.2.1 Translasi	25
4.2.2 Penyaringan: Keterbatasan Atribut Material.....	26
4.2.3 Peringkat: Indeks Material	26
4.2.4 Informasi Pendukung	26
4.2.5 Kondisi Lokal.....	27
4.3 Indeks Material.....	27
4.3.1 Meminimalkan Massa.....	27

4.3.2	Meminimalkan Volume	28
4.3.3	Meminimalkan Biaya Material	29
4.4	Prosedur Pemilihan Material	31
4.4.1	Translasi dan Penurunan Indeks Material	31
4.4.2	Screening: Menerapkan Batasan Atribut.....	31
4.4.3	Ranking: Indeks pada Diagram.....	32
4.4.4	Dokumentasi.....	33
4.5	Pemilihan Material Bantuan Komputer.....	34
4.6	Indeks Struktur	34
KASUS STUDI PEMILIHAN MATERIAL		36
5.1	Material Dayung.....	36
5.2	Material Flywheel.....	38
5.3	Material Seal.....	42
5.4	Bejana Bertekanan.....	44
5.5	Material Heat Exchanger	48
MULTIPLE CONSTRAINTS AND CONFLICTING OBJECTIVES		52
6.1	Pemilihan Dengan Berbagai Kendala.....	52
6.2	Tujuan yang Bertentangan.....	55
6.3	Kesimpulan.....	61
CASE STUDIES: MULTIPLE CONSTRAINTS AND CONFLICTING OBJECTIVES		63
7.1	Light Pressure Vessel	63
7.2	Connecting Rods for High Performance Engines	65
7.3	Kaki-Kaki Meja.....	69
7.4	Kaliper Rem Disk.....	70
7.5	Ringkasan	73
PROSES DAN PEMILIHAN PROSES.....		74
8.1	Klasifikasi Material	75
8.2	Proses: Pembentukan, Joining, Finishing.....	76
8.3	Pemrosesan Sifat Material.....	88
8.4	Sistematika Pemilihan Proses.....	90
8.5	Pemeringkatan: Biaya Proses	101
8.6	Proses Pemilihan Berbasis Komputer	106
STUDI KASUS PEMILIHAN PROSES MANUFAKTUR		107
9.1	Pengecoran Con-Rod Aluminium	107
9.2	Pembuatan Kipas.....	109
9.3	Insulator Busi	115
9.4	Pelindung Manifold.....	117
9.5	Penggabungan Radiator Baja	118
9.6	Pengerasan Permukaan pada Lintasan Bantalan Bola.....	119
PEMILIHAN MATERIAL DAN BENTUK		121
10.1	Faktor Bentuk.....	121
10.2	Keterbatasan Efisiensi Bentuk.....	129

10.3	Eksplorasi Kombinasi Material-Bentuk	130
10.4	Indeks Material yang Mencakup Bentuk.....	133
10.5	Grafik Bantu Pemilihan Menggunakan Indeks	136
10.6	Studi Kasus.....	137
MATERIAL HIBRID		143
11.1	Lubang Dalam Ruang Properti Material	145
11.2	Keterbatasan Efisiensi Bentuk.....	146
11.3	Komposit	147
11.4	Struktur Sandwich	153
11.5	Struktur Sel-Busa dan Kisi	160
11.6	Struktur Segmentasi	166
11.7	Contoh Kasus	167
DATA SOURCES FOR DOCUMENTATION		176
12.1	Pengantar	176
12.2	Sumber Informasi Material	176
12.2.1	All Materials.....	176
12.2.2	All Metals.....	177
12.2.3	Nonferrous Metals and Alloys	178
12.2.4	Ferrous Metals.....	186
12.2.5	Polymers and Elastomers	189
12.2.6	Ceramics and Glasses.....	190
12.2.7	Composites: PMCs, MMCs, and CMCs	191
12.2.8	Foams and Cellular Solids	192
12.2.9	Stone, Rocks, and Minerals.....	192
12.2.10	Timber Woods and Wood-Based Composites	192
12.2.11	Natural Fibers and Other Natural Materials Natural: General	194
12.2.12	Measures of Environmental Impact	200
12.3	Information for Manufacturing Processes	202
12.4	Databases and Experts Systems as Software.....	203
12.5	Additional Usefull Internet Sites.....	204
MATERIAL DAN LINGKUNGAN.....		207
13.1	Siklus Hidup Material	207
13.2	Material dan Sistem Konsumsi Energi.....	208
MATERIAL DAN DESAIN INDUSTRI		210
14.1	Piramida Persyaratan	210
14.2	Karakter Produk	210
14.3	Menggunakan Bahan dan Proses untuk Menciptakan Personaliti Produk	212
14.4	Daya Tarik Pasar dan Tekanan Sains	216
14.5	Populasi Pertumbuhan dan Kejenuhan Pasar	219
14.6	Tanggung Jawab Produk dan Penyediaan Layanan	219
14.7	Miniaturisasi dan Multifungsi	219
14.8	Kepedulian Lingkungan dan Individu.....	220

REFERENSI 221

PENGANTAR MATERI KULIAH

1.1. Pengertian Desain

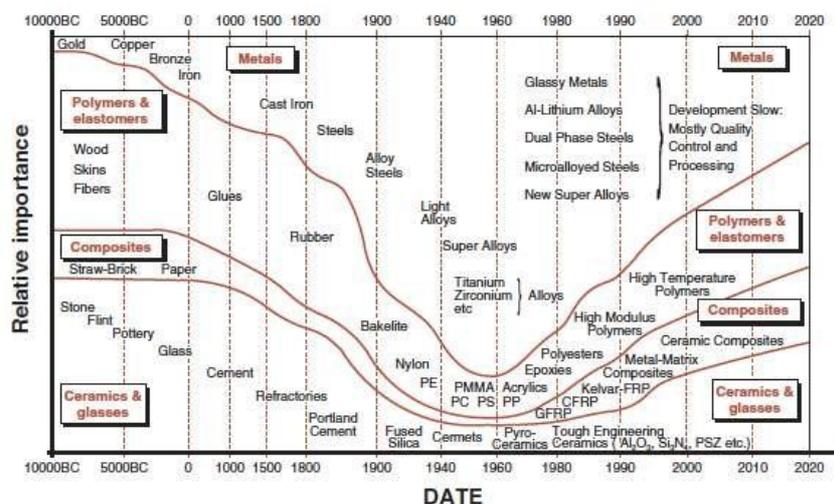
Desain adalah proses menerjemahkan ide baru atau kebutuhan pasar ke dalam informasi rinci dari mana produk dapat diproduksi. Setiap tahapan memerlukan pengetahuan tentang material yang akan digunakan dan bagaimana proses membuatnya. Pemilihan material sangat dipengaruhi oleh desain produk yang akan dibuat atau produk lama tetapi menggunakan material baru berdasarkan pertimbangan tertentu. Saat ini, jumlah material yang tersedia lebih dari 120.000 jenis. Standarisasi material digunakan untuk mengurangi jumlah material, material baru dengan sifat baru yang memiliki kebaruan, masih dapat dieksploitasi lebih lanjut.

Pemilihan material tidak dapat dilepaskan dari pemilihan proses, karena berkaitan dengan pembentukan, assembling, finishing dan perlakuan material di akhir produksi. Faktor lain yang perlu dipertimbangkan adalah biaya dan dampak penggunaan material bagi lingkungan. Tidak dapat dipungkiri bahwa bentuk, warna, tekstur, tampilan dan dekorasi merupakan masalah mendasar bagi konsumen yang tidak dapat diabaikan.

Desain produk selalu bersifat terbuka, dan bukan masalah analitis seperti mekanika, struktur, atau termodinamika yang umumnya memiliki jawaban tunggal yang benar. Keterbukaan untuk mempertimbangkan segala kemungkinan merupakan jalan paling baik dalam mendesain produk.

1.2. Evolusi Material

Sebuah zaman yang sudah dilalui manusia sudah mengenal peranan material untuk menunjang kehidupannya. Tentu perkembangan material menyesuaikan dengan kebutuhan manusia dan kemampuan berpikir manusia di setiap zaman. Kita telah mengenal zaman batu, perunggu, besi. Saat kemajuan peradaban berkembang pesat, kita mengenal jam tangan dari titanium, raket tenis berlapis serat karbon, sepeda gunung komposit matrix logam, helm kecelakaan poliether-etil-eton.



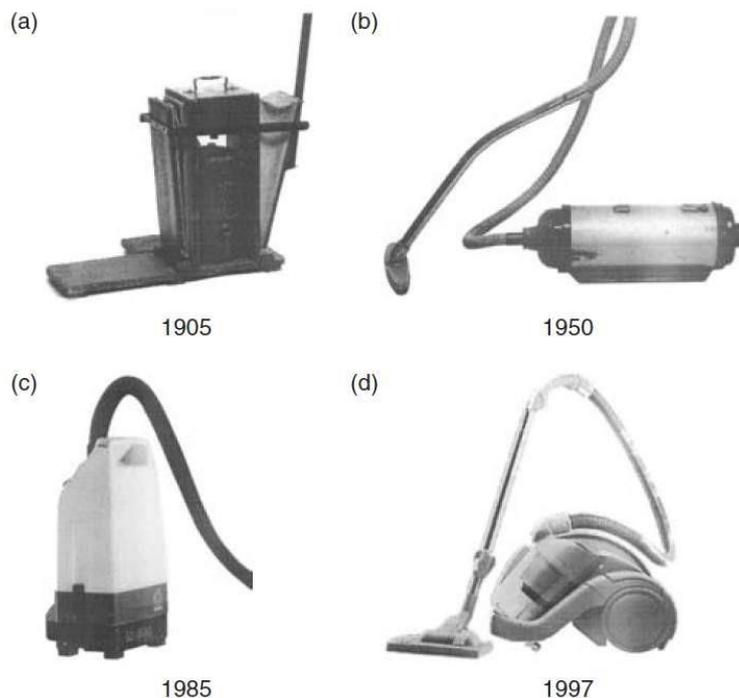
Gambar 1.1 Evolusi material teknik

Evolusi material ditunjukkan oleh Gambar 1.1. Bahan pra-sejarah (<10.000 SM, Zaman Batu) yang dianggap penting adalah keramik, gelas, polimer alami, dan komposit. Senjata yang selalu menjadi puncak teknologi, terbuat dari kayu dan batu api. Bangunan dan jembatan tersusun dari batu dan kayu. Emas dan perak memiliki pengaruh besar sebagai mata uang, tetapi peran dalam teknologi relatif kecil. Pengembangan termo-kimia dasar memungkinkan ekstraksi tembaga dan perunggu, kemudian besi (Zaman Perunggu, 4000-1000 SM dan Zaman Besi, 1000 SM-1620 M) memicu kemajuan teknologi.

Sejak tahun 1960 semua yang telah berubah. Tingkat pengembangan logam baru paduan mulai melambat, sedangkan polimer dan komposit di industri mengalami perkembangan yang sangat pesat. Demikian juga untuk penggunaan keramik sebagai material yang terus berkembang.

1.3 Studi Kasus: Evolusi Material Dalam Penyedot Debu

Penyedot debu tahun 1900 menggunakan tenaga manusia seperti ditunjukkan Gambar 1.2a. Dengan menggunakan pegangan pembersih, maka dilakukan pemompaan untuk menghasilkan tekanan sehingga udara tersedot melalui logam yang berisi filter dengan laju aliran sebesar 1 liter/detik. Material yang digunakan hampir seluruhnya berasal dari alam, seperti kayu, kanvas, kulit dan karet. Satu-satunya logam yang digunakan adalah tali yang menghubungkan bellow (besi lunak) dan kaleng yang mengandung filter (lembaran baja ringan, digulung untuk membuat silinder). Kondisi ini merupakan cerminan perkembangan material tahun 1900-an, bahkan mobilpun juga terbuat dari kayu, kulit, dan karet; hanya mesin dan drive train harus logam.



Gambar 1.2 Evolusi vacuum cleaner

Pada tahun 1950 desain telah berevolusi menjadi pembersih silinder yang ditunjukkan pada Gambar 1.2b dengan laju aliran sebesar 10 liter/detik. Aliran udara aksial, ditarik melalui

silinder oleh kipas listrik. Kipas menempati sekitar setengah panjang silinder; sisanya memegang filter. Satu kemajuan dalam desain ini adalah pompa udara berpengerak listrik. Motor dengan ukuran besar, tetapi berdaya rendah dapat difungsikan secara terus-menerus. Yang menarik adalah hampir semua material yang digunakan adalah logam: casing, topi akhir, pelari, bahkan tabung untuk menyedot debu adalah baja ringan: logam telah sepenuhnya menggantikan bahan alami.

Penyedot debu 1985 pada Gambar 1.2c menunjukkan daya yang dibutuhkan sebesar 800W, yang memiliki daya 2 kali dari yang sekarang tersedia. Aliran udara masih aksial dan penghapusan debu oleh filtrasi dengan unit yang berukuran lebih kecil. Kemajuan dalam desain ini adalah penggunaan bahan magnetik yang lebih baik, suhu operasi yang lebih tinggi karena isolasi tahan panas, berliku, dan bantalan. Casing sepenuhnya terbuat dari polimer dan menjadi contoh desain yang baik yang berbahan plastik. Tidak ada material logam yang terlihat, semua polypropylene. Jumlah komponen berkurang secara dramatis: casing hanya terdiri dari 4 bagian yang disatukan dengan 1 pengikat. Jumlah ini berbeda dengan vacuum cleaner tahun 1950 yang terdiri dari 11 bagian dan 28 pengikat.

Penghematan berat dan biaya sangat besar. Pembersih yang ditunjukkan pada Gambar 1.2d mengeksplorasi konsep yang berbeda: pemisahan inersia daripada filtrasi. Kekuatan dan kecepatan rotasi tinggi; produksi lebih besar, lebih berat dan lebih mahal.

Tabel 1.1 Perbandingan vacuum cleaner sesuai material

Cleaner and date	Dominant materials	Poer (W)	Weight (kg)	Approximate cost
Hand powered, 1990	Wood, canvas, leather	50	10	\$380
Cylinder, 1950	Mild steel	300	6	\$150
Cylinder, 1985	Molded ABS, polypropylene	800	4	\$95
Dyson, 1995	Polypropylene, polycarbonate, ABS	1200	6.3	\$300

Desain kompetitif membutuhkan penggunaan bahan baru yang inovatif dan mengeksplorasi sifat-sifat material itu sendiri, baik teknis maupun estetika. Banyak produsen penyedot debu gagal berinovasi dan mengeksplorasi yang menyebabkan hilangnya mereka.

1.4 Ringkasan dan Kesimpulan

Jumlah material yang tersedia saat ini mencapai puluhan ribu. Seorang insinyur desain harus mampu memilih material mana yang cocok dan dapat berfungsi secara optimal. Hal ini menuntut penguasaan pengetahuan tentang material, sifat-sifatnya dan proses manufakturnya. Rekayasa material berkembang sangat cepat pilihan material menjadi lebih beragam. Sebagai contoh botol di masa lalu menggunakan kaca atau logam, akan tetapi akhir-akhir ini peran itu dapat digantikan oleh plastic atau aluminum. Demikian juga untuk kebutuhan rumah tangga lainnya.

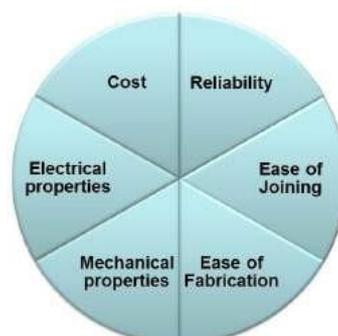
2.1 Review Pemilihan Material

Material yang digunakan dalam produk memiliki dampak besar pada keberhasilan produk. Pemilihan material yang tidak sempurna mengakibatkan kapasitas penjualan yang buruk atau pengambilan atas produk. Proses pemilihan material untuk komponen mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi persyaratan desain.
2. Mengidentifikasi kriteria pemilihan bahan.
3. Identifikasi material kandidat.
4. Mengevaluasi material kandidat.
5. Pemilihan material.

Identifikasi Persyaratan Desain. Persyaratan desain terdiri dari beberapa item, antara lain:

1. Persyaratan kinerja. Persyaratan kinerja menjelaskan atribut komponen yang berfungsi sesuai kebutuhan. Atribut dijelaskan dalam sifat mekanik, elektromagnetik, termal, optik, fisik, kimia, elektrokimia, dan kosmetik.
2. Persyaratan keandalan. Keandalan komponen mengacu pada kemampuannya untuk berfungsi selama periode penggunaan tertentu. Kondisi penggunaan yang dimaksud adalah paparan suhu tinggi, air garam, dan getaran.
3. Persyaratan ukuran, bentuk, dan massa. Biaya untuk pembuatan komponen tergantung pada material yang menyusun komponen, proses manufaktur yang digunakan, apakah komponen dibuat khusus, kuantitas material atau komponen yang dibeli dan kualitas material.
4. Persyaratan biaya.
5. Persyaratan manufaktur dan perakitan.
6. Standar industri.
7. Peraturan pemerintah.
8. Persyaratan kekayaan intelektual.
9. Persyaratan keberlanjutan.

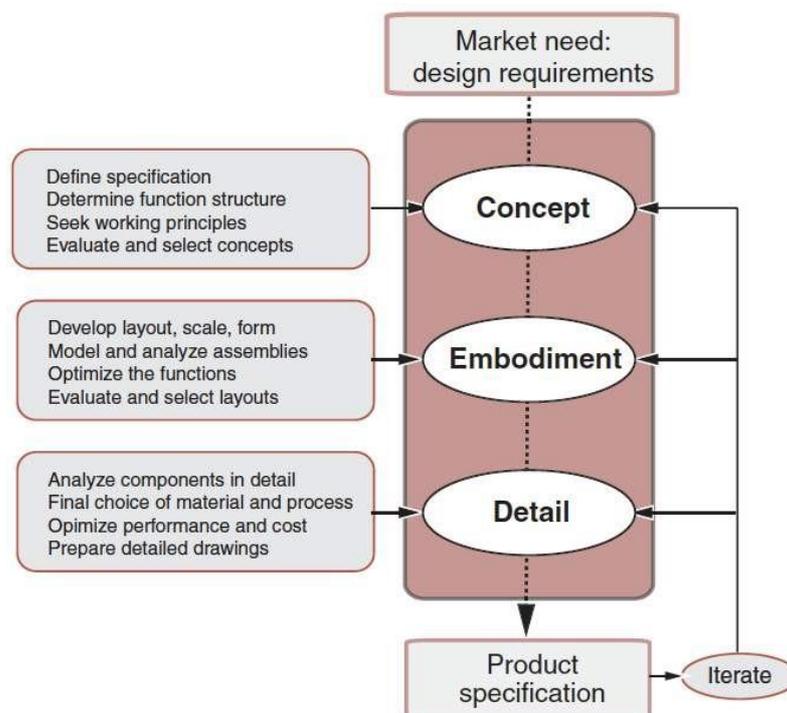


Gambar 2.1 Kebutuhan desain

2.2 Proses Desain

Desain mekanis berkaitan dengan prinsip-prinsip fisika, berfungsi dengan tepat dan produksi sistem mekanisnya. Desain industri yang membahas tentang pola, warna, tekstur, dan daya tarik konsumen tidak dapat diabaikan. Tahapan utama adalah desain mekanis yang baik dan tata cara pemilihan material dan proses. Untuk itu perlu dikembangkan sebuah metodologi untuk memilih material dan proses yang berkaitan dengan desain dan persyaratan fungsional desain sebagai input

Titik awal adalah kebutuhan pasar atau ide baru, titik akhir adalah spesifikasi produk lengkap yang memenuhi kebutuhan atau mewujudkan ide. Kebutuhan harus diidentifikasi sebelum dapat dipenuhi. Hal ini penting untuk untuk merumuskan pernyataan kebutuhan, misalnya "perangkat diperlukan untuk melakukan tugas X" dan dinyatakan sebagai seperangkat persyaratan desain. Pernyataan kebutuhan dan spesifikasi produk ditunjukkan pada Gambar 2.2.

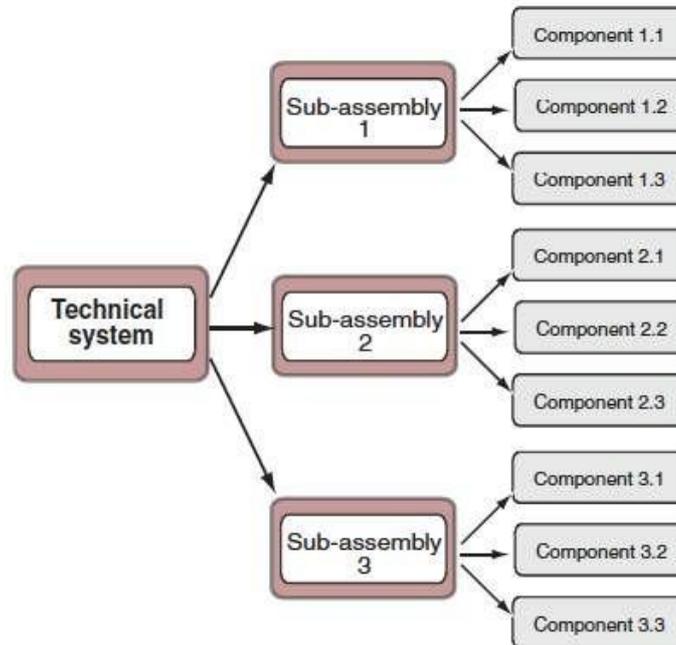


Gambar 2.2 Diagram alir desain

Produk adalah sistem teknis yang terdiri dari komponen-komponen yang disatukan untuk menjalankan fungsinya. Dekomposisi adalah cara menganalisis desain yang ada, tetapi tidak banyak membantu dalam proses desain itu sendiri terutama desain baru. Untuk mewujudkan tujuan ini, maka harus didasarkan pada ide-ide analisis system, yaitu mempertimbangkan input, aliran dan output informasi, energi, dan bahan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4.

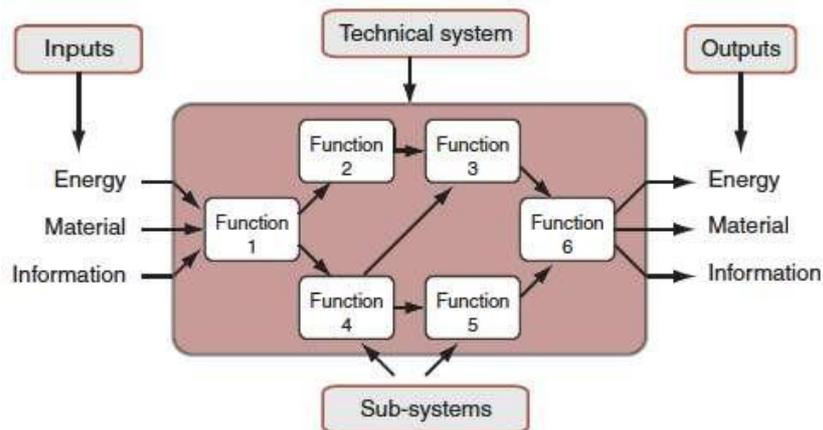
Desain mengubah input menjadi output. Sebuah motor listrik mengubah listrik menjadi energi mekanik, penempatan membentuk kembali material, alarm pencuri mengumpulkan informasi dan mengubahnya menjadi kebisingan. Dalam pendekatan ini, sistem dipecah menjadi sub-sistem yang saling terhubung dan masing-masing melakukan fungsi tertentu. Pengaturan yang dihasilkan disebut fungsi-struktur atau fungsi dekomposisi sistem. Desain

alternatif menghubungkan fungsi unit dengan cara alternatif, menggabungkan fungsi, atau membaginya. Struktur fungsi memberikan cara sistematis untuk menilai opsi desain.



Gambar 2.3 Analisis sistem teknis

Tahap desain konseptual, semua opsi terbuka. Tahap berikutnya adalah perwujudan yang menganalisis prediksi operasi. Dalam tahapan ini berisi ukuran komponen, pemilihan material yang meliputi tegangan, suhu, dan lingkungan yang disarankan oleh persyaratan desain, dan perkiraan biaya produksi. Tahap desain rinci berisi spesifikasi setiap komponen. Pertimbangan akhi adalah geometri dan material yang digunakan untuk memperhitungkan biaya.



Gambar 2.4 Pendekatan sistem untuk menganalisa sistem teknis

2.3 Tipe Desain

Material baru menawarkan kombinasi baru dan unik. Silikon dengan kemurnian tinggi dapat digunakan sebagai transistor, kaca kemurnian tinggi untuk serat optik; magnet gaya koersif tinggi untuk miniature earphone dan sebagainya. Material baru menunjukkan produk baru atau

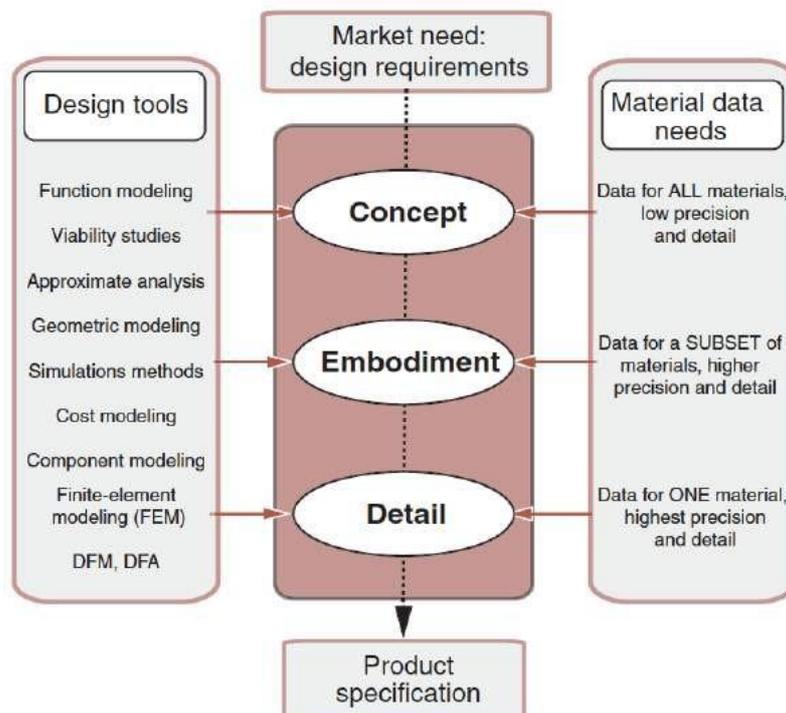
produk baru menuntut pengembangan material baru. Teknologi nuklir mendorong pengembangan paduan berbasis zirkonium dan stainless steel rendah karbon. Teknologi ruang angkasa mendorong pengembangan komposit ringan. Teknologi turbin mendorong pengembangan paduan suhu tinggi dan keramik.

Dalam pengembangan desain adaptif menggunakan konsep yang sudah ada dengan menyempurnakan prinsip kerja. Penggantian logam dengan polimer dalam peralatan rumah tangga, serat karbon menggantikan kayu dalam barang-barang olahraga. Peluang pasar pada peralatan rumah tangga dan olah raga memiliki peluang yang kompetitif.

Desain varian melibatkan perubahan skala atau dimensi atau detail tanpa perubahan fungsi atau metode untuk mencapainya, seperti pembersihan boiler, bejana bertekanan dan turbin. Perubahan ukuran juga memerlukan perubahan material, seperti perahu kecil terbuat dari fiberglass, sedangkan kapal besar terbuat dari baja. Boiler kecil terbuat dari tembaga, sedangkan boiler besar terbuat dari baja. Demikian seterusnya.

2.4 Alat Desain dan Data Material

Implementasi diagram alir desain dapat digunakan alat desain. Alat desain dapat menjadi inputan. Alat desain memungkinkan untuk pemodelan dan optimalisasi desain, dan memudahkan aspek rutinitas pada masing-masing fase.



Gambar 2.5 Diagram alir desain yang menunjukkan bagaimana memilih alat desain dan material

Paket pemodelan geometris dan 3D memungkinkan visualisasi dan membuat file yang dapat dimuat ke sistem prototyping dan manufaktur yang dikontrol secara numerik. Paket FE dan CFD memungkinkan melakukan analisis mekanis dan termal yang tepat bahkan ketika

geometriknya kompleks dan deformasinya besar. Ada perkembangan alami dalam penggunaan alat-alat sebagai desain berkembang, yaitu:

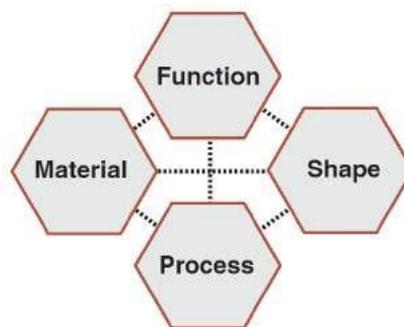
1. Perkiraan analisis dan pemodelan pada tahap konseptual.
2. Pemodelan dan optimasi yang lebih canggih pada tahap perwujudan.
3. Tepat ("tepat"- tetapi tidak pernah ada) analisis pada tahap desain rinci.

Pemilihan bahan memasuki setiap tahap desain. Sifat data yang dibutuhkan pada tahap awal sangat berbeda dalam tingkat presisinya (lihat Gambar 2.5 pada sisi kanan). Pada tahap konsep, desainer membutuhkan perkiraan nilai properti pada berbagai macam material. Semua opsi terbuka: polimer mungkin menjadi pilihan terbaik untuk satu konsep, logam untuk yang lain, meskipun fungsinya sama.

2.5 Fungsi, Material, Bentuk dan Proses

Pemilihan material dan proses tidak dapat dipisahkan dari pemilihan bentuk. Untuk membuat bentuk, material mengalami proses seperti pengecoran, penempaan, permesinan, pengeboran, poles dan pengelasan. Gambar 2.6 menunjukkan interaksi antara fungsi, material, bentuk dan proses. Fungsi berpengaruh terhadap pemilihan material dan bentuk. Sedangkan proses dipengaruhi oleh sifat material, seperti formability, machinability, weldability, heat-treatability, dan sebagainya.

Proses berkaitan dengan bentuk dimana proses akan menentukan bentuk, ukuran, presisi dan biaya. Interaksi dua arah: spesifikasi bentuk membatasi pilihan material dan proses, tetapi spesifikasi proses membatasi material yang digunakan dan bentuk yang diambil. Semakin canggih desainnya, semakin ketat spesifikasi dan semakin besar interaksinya. Interaksi antara fungsi, material, bentuk, dan proses terletak pada proses pemilihan material.



Gambar 2.6 Permasalahan utama pemilihan material dalam desain mesin: interaksi fungsi, material, bentuk dan proses.

2.6 Studi Kasus

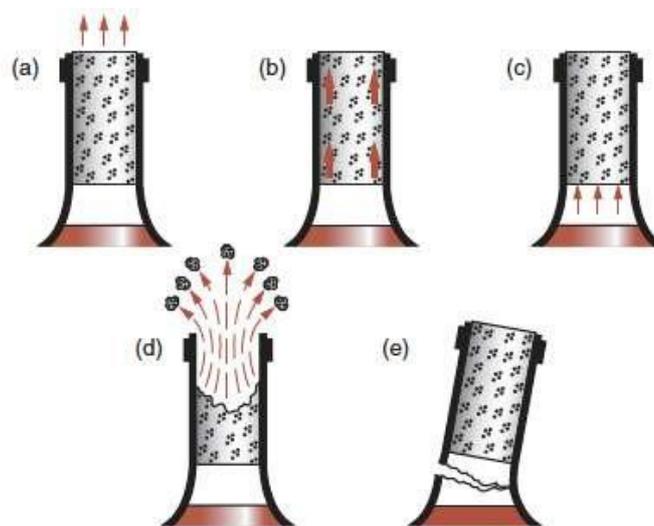
Untuk menjamin wine tetap awet maka diberikan tutup gabus pada ujung botol. Yang menjadi persoalan bagaimana mekanisme untuk membuka botol tersebut sehingga wine dapat dituangkan ke dalam gelas dan dinikmati. Lima konsep untuk membuka gabus dari ujung botol ditunjukkan oleh Gambar 2.7, yaitu traksi aksial (tarik), traksi geser, mendorong keluar dari bawah, menghancurkannya atau mengetuk leher botol.

Tiga konsep pertama banyak digunakan. Gambar 2.9 menunjukkan konsep pertama yaitu sekrup diulir ke dalam gabus dan menarik secara aksial, kedua dengan menggunakan pisau

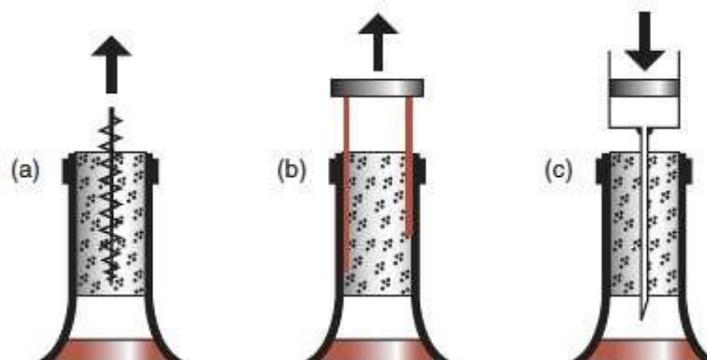
elastis ramping yang dimasukkan ke sisi gabus, menggeser dan menarik secara aksial dan ketiga gabus ditusuk dengan jarum berongga dimana gas dipompa untuk mendorongnya keluar.



Gambar 2.7 Kebutuhan pasar: alat untuk membuka botol.

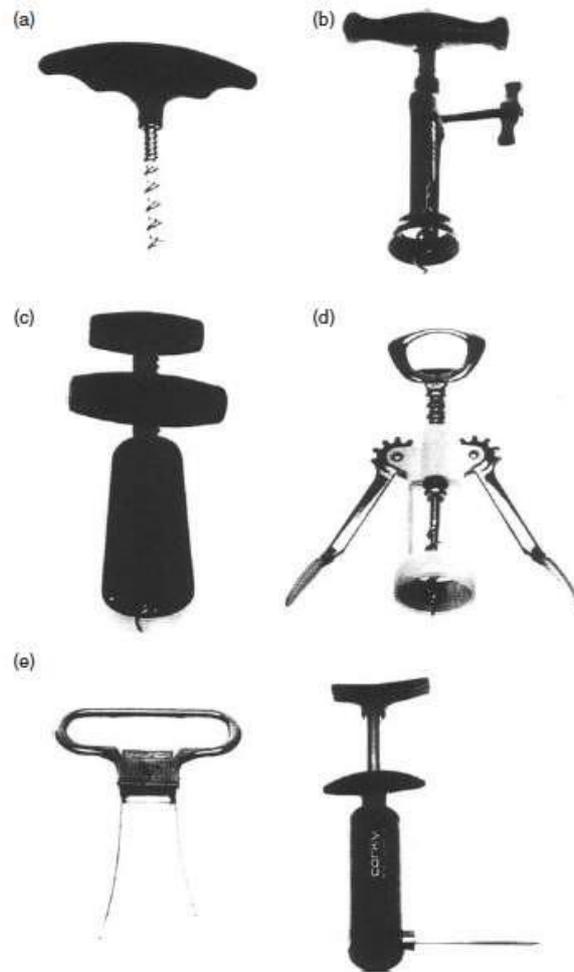


Gambar 2.8 Lima konsep untuk membuka gabus pada botol

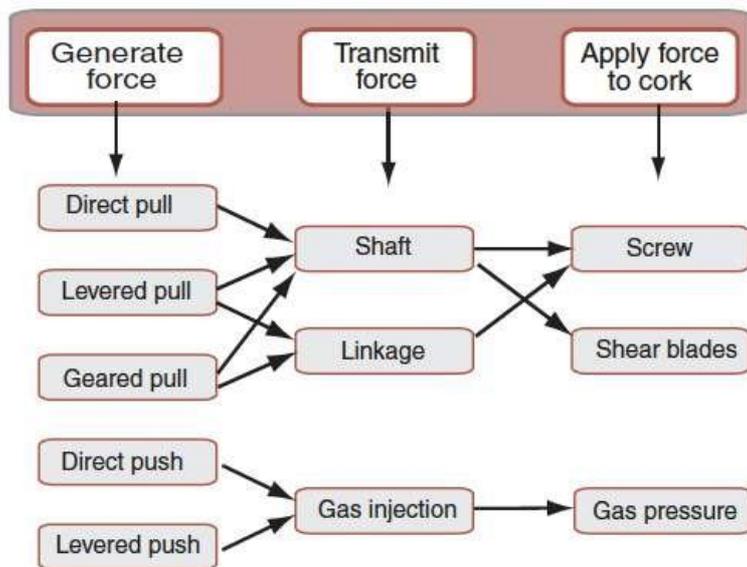


Gambar 2.9 Prinsip kerja untuk implementasi 3 skema pertama

Gambar 2.10 menunjukkan contoh pelepas gabus yang prinsip kerja secara aksial. Gambar 2.11 menunjukkan gaya, meneruskan gaya, menerapkan kekuatan ke gabus.

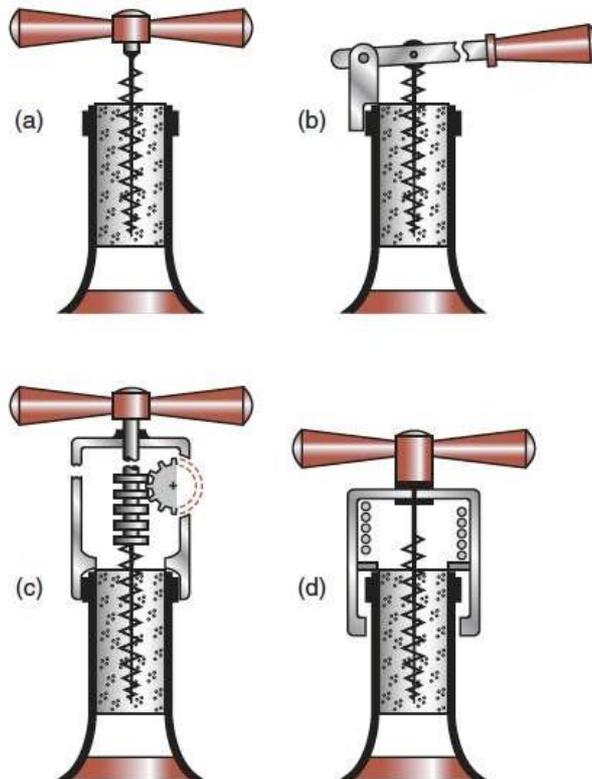


Gambar 2.10 Pelepas gabus yang menggunakan prinsip kerja (a) tarik langsung (b) tuas gigi, tarikan dengan bantuan sekrup; (c) tarikan bantuan pegas, (d) sistem pisau geser; (e) sistem pelepas yang diinduksi tekanan.



Gambar 2.11 Struktur fungsi dan prinsip kerja pelepas gabus

Gambar 2.12 menunjukkan sketsa perwujudan perangkat berdasarkan satu konsep, yaitu traksi aksial. Yang pertama adalah tarikan langsung, sedangkan tiga lainnya menggunakan keuntungan mekanis, yaitu tarikan tuas, tarikan roda gigi, dan tarikan berolah gas.



Gambar 2.12 Sketsa perwujudan empat konsep: tarik langsung, tarikan tuas, tarikan roda gigi dan tarikan dibantu pegas.

Perwujudan Gambar 2.9 mengidentifikasi persyaratan fungsional yang dapat dinyatakan dalam pernyataan seperti:

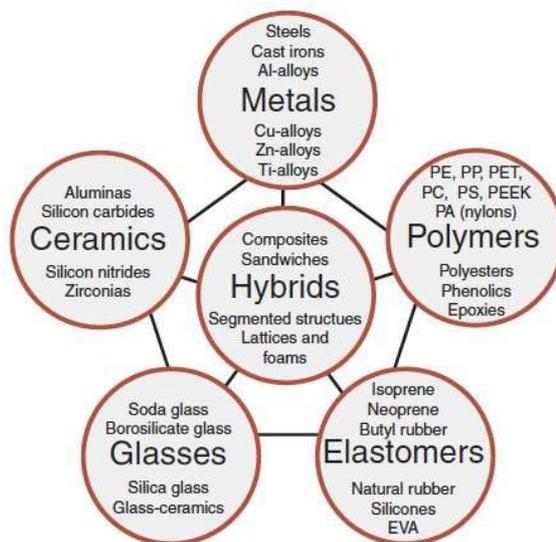
- a. Sekrup murah untuk meneruskan beban ke gabus.
- b. Tuas ringan untuk membawa momen lentur.
- c. Pisau elastis ramping yang tidak akan menekuk ketika digerakkan antara gabus dan leher botol.
- d. Jarum tipis, berongga, kaku dan cukup kuat untuk menembus gabus.

MATERIAL TEKNIK DAN SIFAT-SIFATNYA

Produk yang baik adalah yang berfungsi baik, layak jual dan memuaskan konsumen. Untuk mendapatkan kondisi ini dibutuhkan eksploitasi potensi dan karakteristik material. Kelompok material seperti logam, polimer, keramik, dan sebagainya akan dibahas pada bab ini.

3.1 Kelompok Material Teknik

Material dapat diklasifikasikan ke dalam enam kelompok, yaitu logam, polimer, elastomer, keramik, kaca, dan hibrida seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1. Setiap klasifikasi material dapat saja memiliki properti dan alur proses yang serupa, dan bahkan digunakan untuk keperluan yang sama.



Gambar 3.1 Klasifikasi material teknik

Logam memiliki modulus elastisitas yang relatif tinggi. Logam adalah keadaan murni, cenderung lembut dan mudah cacat. Logam dapat dibuat kuat dengan menambahkan unsur paduan atau perlakuan mekanis dan panas. Logam yang dihasilkan tetap ulet, sehingga masih memungkinkan dibentuk melalui proses deformasi. Paduan kekuatan tinggi tertentu seperti baja pegas memiliki daktilitas hingga 1 persen, tetapi terjadi luluh sebelum patah. Patahan yang terjadi adalah patah ulet. Karena daktilitasnya, logam menjadi rentan terhadap kelelahan tetapi tahan terhadap korosi.

Keramik memiliki modulus tinggi, tetapi rapuh. Kekuatan tarik keramik adalah kekuatan patah getasnya. Sedangkan kekuatan tekannya mencapai 15 kali lebih besar. Karena daktilitasnya yang rendah, maka keramik memiliki toleransi yang rendah pada konsentrasi tegangan atau tekanan kontak tinggi. Bahan ulet memungkinkan distribusi beban lebih merata pada saat deformasi sehingga dapat digunakan di bawah beban statis dengan margin kecil dari

kekuatannya. Hal ini tidak mungkin terjadi pada keramik. Keramik memiliki fitur kaku, keras, dan tahan abrasi, tahan terhadap suhu tinggi, dan ketahanan korosinya baik.

Kaca adalah padatan non-kristalin (amorf). Yang paling lazim digunakan adalah kaca soda-kapur dan boro-silikat sebagai botol dan ovenware. Logam juga dapat dibuat non-kristalin melalui pendinginan cepat. Kurangnya struktur kristal menyebabkan keramik dan kaca menjadi keras, rapuh dan rentan terhadap konsentrasi tegangan.

Polimer memiliki modulus yang rendah, kira-kira 50 kali lebih sedikit daripada logam, tetapi kekuatan polimer dapat sekuat logam. Defleksi elastisitasnya cukup besar, dapat mulur pada suhu kamar. Sifat-sifat polimer tergantung pada suhu. Polimer yang tangguh dan fleksibel pada 20⁰C akan menjadi rapuh pada 4⁰C, dapat mulur sangat cepat pada 100⁰C. Kombinasi sifat seperti kekuatan dan berat menjadi penting. Polimer juga mudah dibentuk dalam satu operasi. Finishing yang dilakukan paling-paling pewarnaan. Polimer juga memiliki ketahanan korosi yang baik.

Elastomer adalah polimer rantai panjang di atas suhu transisi kaca, T_g. Ikatan kovalen yang menghubungkan unit rantai polimer tetap utuh, tetapi ikatan Van der Waals dan ikatan hydrogen lebih lemah. Modulus Young elastomer 10⁻³GPa (10⁵ kali lebih kecil dari logam) yang meningkat seiring dengan suhu.

Hibrida adalah kombinasi dari dua atau lebih bahan dalam konfigurasi dan skala tertentu. Hibrida menggabungkan sifat menarik dari kelompok material dan menghindari beberapa kelemahannya. Kelompok material hibrida adalah komposit serat dan partikulat, struktur sandwich, struktur kisi, busa, kabel, dan laminasi. Semua bahan alam, seperti kayu, tulang, kulit, daun adalah hibrida. Saat ini, komposit dengan matriks polimer diperkuat dengan serat kaca, karbon atau Kevlar (aramid). Sifat material ini ringan, kaku dan kuat, dan tangguh, tetapi tidak dapat digunakan pada suhu di atas 250⁰C. Material hibrida relatif mahal dan sulit untuk dibentuk dan digabung.

3.2 Pengertian Sifat Material

Sifat-sifat standar material antara lain kepadatan, modulus, kekuatan, ketangguhan, konduktivitas termal dan listrik.

Densitas adalah massa per satuan volume. Satuan densitas adalah kg/m³. Pengukuran dilakukan dengan merujuk teori Archimedes, yaitu dengan menimbang berat di udara dengan di dalam cairan yang densitasnya diketahui.

Harga adalah biaya material yang mencakup rentang tertentu. Satuan yang digunakan dalam buku ini adalah \$/kg. Biaya material tertentu \$0.2 / kg, namun di lain waktu dapat mencapai \$1000/kg. Harga material mengalami fluktuasi, dan tergantung pada kuantitas yang dibutuhkan. Terlepas dari ketidakpastian ini, sangat penting untuk dapat memperkirakan harga dalam pemilihan material.

3.2.1 Sifat-sifat Mekanis

Modulus elastisitas adalah kemiringan bagian elastis linier pada kurva tegangan-regangan. Satuan yang digunakan adalah GPa atau GN/m². **Modulus Young E** menggambarkan respons terhadap pembebanan tarik atau tekan. **Modulus geser G** menjelaskan pembebanan geser.

Modulus curah K adalah tekanan hidrostatik. **Rasio Poisson** ν adalah bilangan yang tidak berdimensi yang menyatakan rasio regangan lateral ε_2 dan regangan aksial ε_1 . Pada pembebanan aksial diperoleh:

$$\nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Tabel 3.1 Sifat material dan satuan SI

Kelas	Sifat	Simbol	Satuan
Umum	Densitas	ρ	Kg/m^3 atau Mg/m^3
	Harga	C_m	$\text{\$/kg}$
Mekanis	Modulus elastisitas	E, G, K	GPa
	Kekuatan luluh	σ_y	MPa
	Kekuatan ultimate	σ_u	MPa
	Kekuatan kompresi	σ_c	MPa
	Kekuatan patah	σ_f	MPa
	Kekerasan	H	Vickers
	Elongasi	ε	-
	Batas ketahanan lelah	σ_e	MPa
	Ketangguhan patah	K_{IC}	$\text{MPa.m}^{1/2}$
	Ketangguhan	G_{IC}	kJ/m^2
	Kapasitas damping	η	-
Termal	Titik leleh	T_m	C atau K
	Suhu kaca	T_g	C atau K
	Suhu layanan maksimum	T_{max}	C atau K
	Suhu layanan minimum	T_{min}	C atau K
	Konduktifitas termal	λ	W/m.K
	Panas spesifik	C_p	J/kg.K
	Koefisien ekspansi termal	α	K^{-1}
	Ketahanan kejutan termal	ΔT_s	C atau K
Elektris	Resistivitas elektrik	ρ_e	$\Omega.m$ atau $\mu\Omega.cm$
	Konstanta dielektrik	ε_d	-
	Potensi breakdown	V_b	10^6 V/m
	Factor daya	P	-
Optis	Optikal, transparan, buram, translucent	Yes/No	
	Indeks retraksi	n	-
Eco-properties	Energy/kg to extract material		MJ/kg
	CO_2/kg to extract material		Kg/kg
Ketahanan terhadap lingkungan	Laju oksidasi	Very low, low, avrg High, very high K_A	MPa
	Laju korosi		
	Konstanta laju keausan		

Modulus yang diukur sebagai kemiringan kurva tegangan-regangan tidak akurat disebabkan oleh pengaruh anelastisitas, creep dan faktor-faktor lain. Pengukuran modulus yang akurat dilakukan secara dinamis, yaitu dengan menarik getaran alami balok atau kawat, atau

dengan mengukur kecepatan gelombang suara dalam material. Pada material isotropik, modulus dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$E = \frac{3G}{1 + G/3K}; \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}; \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Umumnya $\nu = 1/3$ jika:

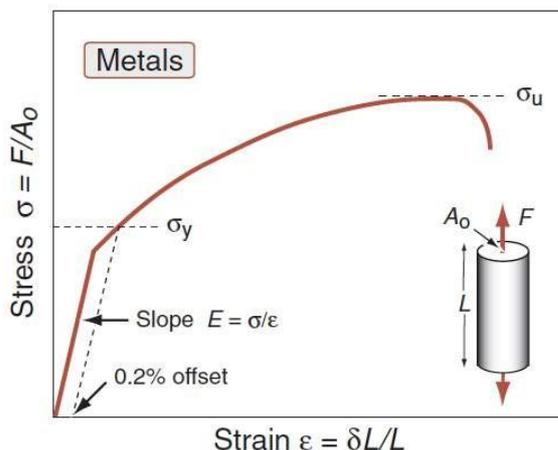
$$G \approx \frac{3}{8}E \quad \text{dan} \quad K \approx E$$

Sedangkan elastomer adalah pengecualian. Untuk $\nu = 1/2$ jika:

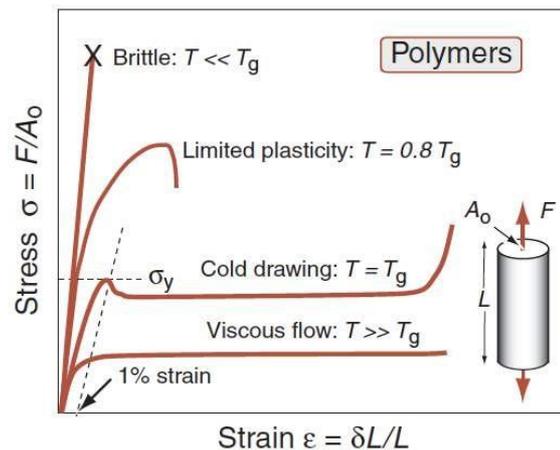
$$G \approx \frac{1}{3}E \quad \text{dan} \quad K \geq E$$

Kekuatan σ_f pada material padat menggunakan satuan MPa atau MN/m². Untuk mengidentifikasi kekuatan logam dengan menggunakan offset 0.2 persen. Sedangkan pada polimer digunakan regangan 1%. Hal ini disebabkan oleh luluh geser. Polimer 20% dalam kompresi daripada tarikan. Kekuatan keramik dan kaca tergantung pada mode pembebanan. Kekuatan tekan biasanya 10-15 kekuatan Tarik yang dinyatakan dengan persamaan:

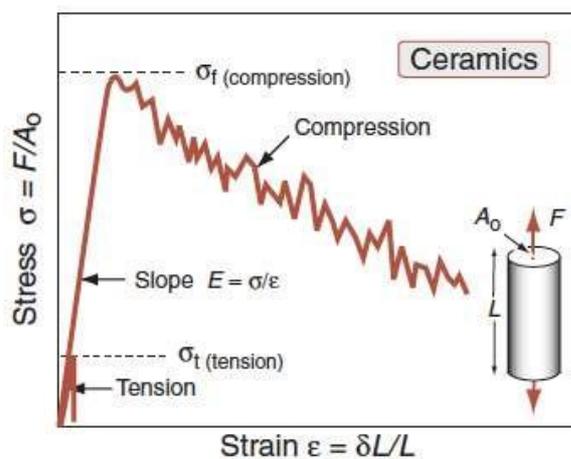
$$\sigma_g = (10 - 15)\sigma_<$$



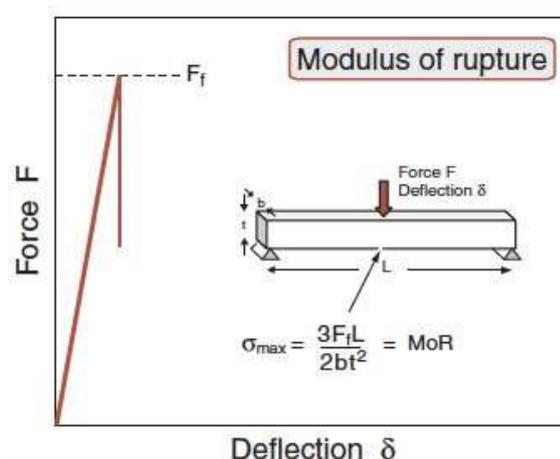
Gambar 3.2 Kurva tegangan regangan untuk logam



Gambar 3.3 Kurva tegangan regangan untuk polimer



Gambar 3.4 Kurva tegangan regangan untuk keramik



Gambar 3.5 MoR adalah tegangan permukaan pada kegagalan lentur

Material keramik dapat diukur kekuatannya dengan menggunakan pengujian lentur. Modulus pecah (MOR) adalah tegangan permukaan maksimum dalam balok pada saat patah. Nilai MOR pada keramik adalah lebih besar 1.3. Kekuatan komposit didefinisikan oleh deviasi perilaku linearelastic 0,5%. Komposit dengan serat termasuk kayu sedikit lebih lemah hingga 30 persen tegangan kompresinya daripada tarikannya karena serat menekuk.

Kekuatan dipengaruhi oleh kelompok material dan mode pembebanannya. Tegangan luluh logam dinyatakan dengan Kriteria Von Mises sebagai fungsi:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_f^2$$

di mana σ_1 , σ_2 , dan σ_3 adalah tegangan utama, positif ketika Tarik. σ_1 adalah tegangan terbesar dan σ_3 adalah tegangan terkecil. Untuk polimer, fungsi luluh dimodifikasi dengan mempertimbangkan pengaruh tekanan, yaitu:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_f^2 \left(1 + \frac{\beta p}{K}\right)^2$$

di mana K adalah modulus bilk polimer, $\beta \approx 2$ adalah koefisien numerik yang mencirikan ketergantungan tekanan kekuatan aliran dan tekanan p yang didefinisikan oleh:

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

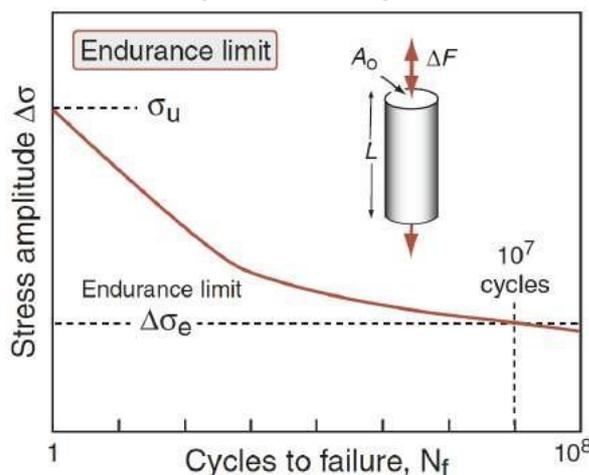
Untuk keramik, dapat digunakan Hukum Coulomb, yaitu:

$$\sigma_1 - B\sigma_2 = C$$

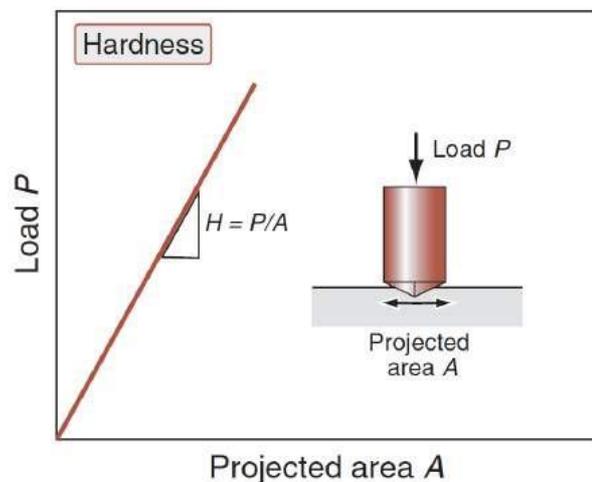
dimana B dan C adalah konstanta.

Kekuatan ultimate adalah tegangan tarik yang bekerja pada batang balok atau bulat. Untuk material getas seperti keramik, kaca dan polimer getas, kekuatan ultimate-nya sama dengan kekuatan gagal dalam tarikan. Untuk logam, polimer ulet dan sebagian besar komposit, kekuatan ultimate-nya lebih besar dari tegangan gagal dengan factor 1.1-3 karena pengerasan hardening.

Pembebanan siklik tidak hanya menghilangkan energi, tetapi juga menyebabkan retakan untuk nukleasi dan tumbuh yang berakhir pada kegagalan kelelahan. Setiap material memiliki batas ketahanan jika memiliki jumlah siklus $N_f > 10^7$.



Gambar 3.6 Batas ketahan adalah tegangan siklik yang menyebabkan kegagalan



Gambar 3.7 Kekerasan adalah beban dibagi dengan luas kontak

Kekerasan adalah ukuran kekuatan material secara kasar. Pengukuran dilakukan dengan menekan intan atau bola baja yang dikeraskan ke permukaan material. Kekerasan didefinisikan sebagai gaya indenter dibagi luas indentasi dan dinyatakan sebagai:

$$H \approx 3\sigma_f$$

dalam sistem SI memiliki satuan MPa. Kekerasan paling umum digunakan skala Vickers HV dengan satuan kg/mm^2 .

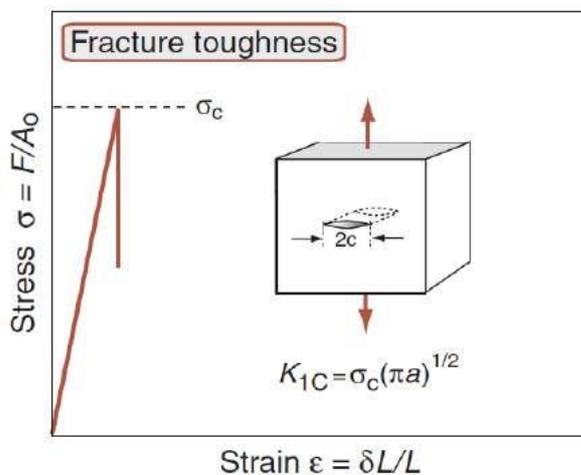
$$HV = \frac{H}{10}$$

Ketangguhan (Toughness) adalah kekuatan material untuk menahan perambatan retakan. Ketangguhan diberikan simbol G_{1C} dengan satuan kJ/m^2 . Ketangguhan patah (fracture toughness) diukur dengan memberikan beban pada sampel yang memiliki retakan dengan panjang $2c$, merekam tegangan tarik σ_c pada saat retakan mengalami perambatan. Simbol yang digunakan adalah K_{1C} dengan satuan $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ atau $\text{MN/m}^{1/2}$. Besarnya K_{1C} dapat dihitung dengan persamaan:

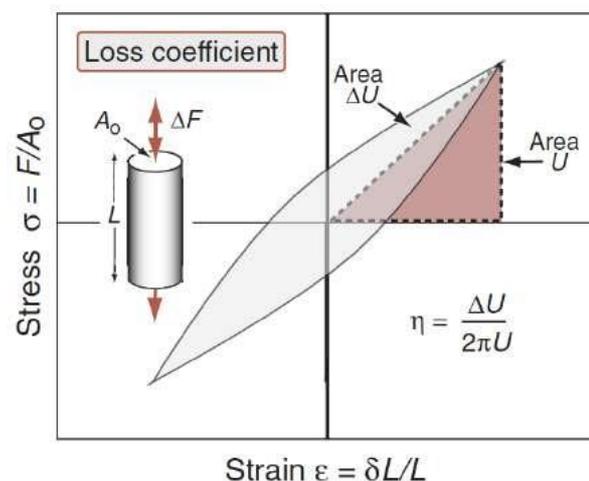
$$K_{1C} = Y\sigma_c\sqrt{\pi c}$$

Ketangguhan material dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

$$G_{1C} = \frac{K_{1C}^2}{E(1 + \nu)}$$



Gambar 3.8 Ketangguhan patah



Gambar 3.9 Koefisien rugi-rugi

di mana Y adalah faktor geometris, dekat kesatuan, yang tergantung pada rincian geometri sampel, E adalah modulus Young dan ν rasio Poisson. Dengan cara ini maka K_{1C} dan G_{1C} bahan rapuh (keramik, kaca dan beberapa polimer) dapat didefinisikan dengan baik.

Koefisien rugi-rugi (loss-coefficient) η adalah ukuran derajat material untuk menghilangkan energi getaran. Jika material dibebani secara elastis ke tegangan maksimum maka energi elastis per satuan volume yang disimpan sebesar:

$$U = \int_0^{\sigma_{\max}} \sigma \, d\epsilon \approx \frac{1}{2} \frac{\sigma_{\max}^2}{E}$$

Jika dibebani dan beban kemudian dilepaskan maka pelepasan energi:

$$\Delta U = \oint \sigma d\varepsilon$$

Maka koefisien rugi-rugi adalah:

$$\eta = \frac{\Delta U}{2\pi U}$$

Kapasitas damping spesifik $D = \Delta U/U$ maka koefisien rugi-rugi adalah:

$$\eta = \frac{D}{2\pi} = \frac{\Delta}{\pi} = \tan \delta = \frac{1}{Q}$$

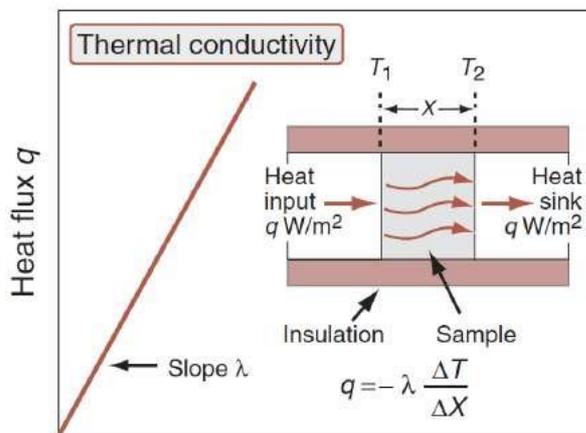
3.2.2 Sifat-sifat Thermal

Suhu leleh T_m dan suhu kaca T_g berkaitan langsung dengan kekuatan ikatan dalam benda padat. Satuan yang digunakan adalah K atau C. Padatan kristalin memiliki titik leleh T_m yang tajam, sedangkan padatan non-kristalin tidak demikian. Suhu T_g mencirikan transisi dari padatan ke cairan yang sangat kental. Dalam desain teknik, sangat penting untuk menentukan suhu layanan maksimum dan minimum T_{max} dan T_{min} .

Suhu maksimum digunakan untuk mengidentifikasi material yang dapat digunakan pada suhu tinggi tanpa terjadi oksidasi, perubahan kimia, atau creep berlebihan. Suhu layanan minimum berkaitan dengan material yang menjadi rapuh atau tidak aman digunakan.

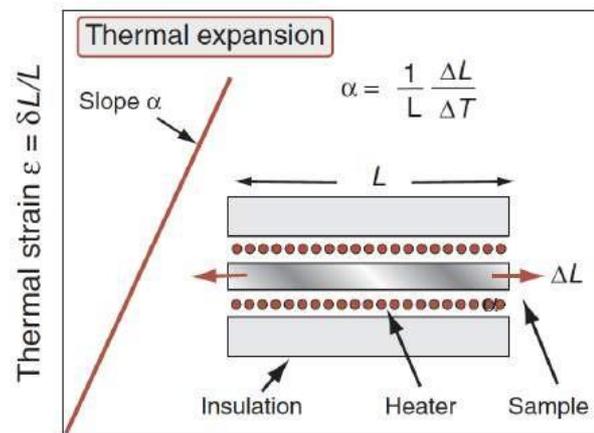
Laju panas yang melalui benda padat pada kondisi tunak disebut konduktifitas termal λ dengan satuan W/m.K. Konduktifitas termal dihitung dari hukum Fourier:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dX} = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{X}$$



Temperature gradient $(T_1 - T_2)/X$

Gambar 3.10 Konduktifitas termal λ



Temperature change ΔT

Gambar 3.11 Koefisien ekspansi termal

Ketika aliran panas bersifat sementara, fluks tergantung pada difusiivitas termal a dengan satuan m^2/s dapat didefinisikan dengan:

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

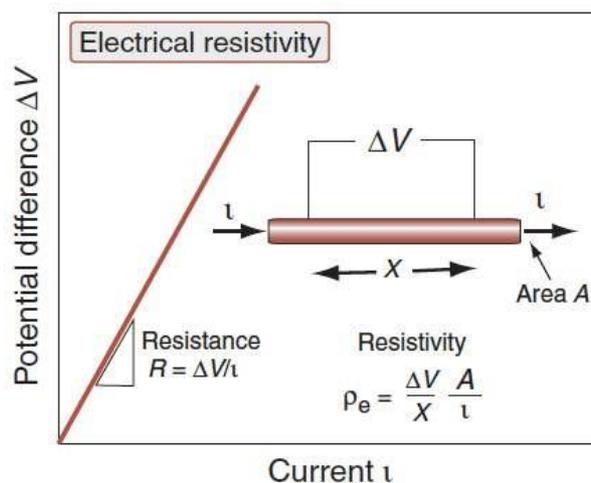
di mana ρ adalah densitas dan C_p adalah panas spesifik pada tekanan konstan (satuan: J/kg.K). Difusi termal dapat diukur secara langsung dengan mengukur peluruan suhu ketika sumber panas dikenakan pada material dimatikan.

Sebagian besar material mengembang ketika dipanaskan. Koefisien ekspansi termal linier dinyatakan dengan α . Jika material adalah isotropic termal maka volume ekspansinya sebesar 3α . Tahanan kejut termal ΔT_s adalah perbedaan suhu maksimum di mana bahan dapat didinginkan tiba-tiba tanpa menimbulkan kerusakan.

Ketahanan creep sangat penting dalam desain material suhu tinggi. Creep berjalan sangat lambat dan tergantung waktu deformasi yang terjadi ketika material dibebani sekitar $1/3 T_m$ atau $2/3 T_g$.

3.2.3 Sifat Elektrik

Resistivitas elektrik ρ_e adalah ketahanan satu kubik satuan dengan beda potensial satuan antara sepasang permukaan. Satuan yang digunakan adalah $\Omega.m$ atau $\mu\Omega.cm$. Jangkauan pengukurannya sangat besar, dari yang lebih kecil dari 10^{-8} dalam satuan $\Omega.m$ (setara dengan $1 \mu\Omega.cm$) untuk konduktor yang baik, hingga lebih dari $10^{16}\Omega m$ ($10^{24} \mu\Omega.cm$) untuk isolator terbaik.



Gambar 3.12 Resistifitas elektrik sebagai gradient potensial V/X dibagi dengan rapat arus

Konduktifitas listrik adalah kebalikan dari resistivitas. Ketika isolator ditempatkan di medan listrik, maka akan terpolarisasi dan muncul mengisi pada permukaannya yang cenderung menyaring interior dari medan listrik. Kecenderungan untuk terpolarisasi diukur dengan konstanta dielektrik ϵ_d (bilangan tanpa dimensi). Untuk ruang kosong, tujuan praktis, dan sebagian besar gas memiliki nilai 1. Sedangkan kebanyakan isolator memiliki nilai antara 2 dan 30, meskipun busa dengan densitas rendah mendekati nilai 1 karena sebagian besar berisi udara.

Potensial breakdown adalah gradien potensial listrik di mana isolator breakdown dan gelombang yang merusak aliran yang melaluinya. Kondisi ini meningkat pada laju yang seragam, yakni potensial bolak-balik 60 Hz yang dikenakan pada permukaan plat material sampai terjadi breakdown.

Polarisasi di dalam medan listrik melibatkan gerakan partikel bermuatan (elektron, ion, atau molekul yang membawa momen dipol). Dalam dielektrik nyata, gerakan partikel bermuatan menghilangkan energi dan aliran membangkitkan tegangan kurang dari 90° . Faktor daya (tanpa dimensi) adalah sinus dari sudut kerugian, dan mengukur fraksi energi yang disimpan dalam dielektrik pada tegangan puncak yang hilang dalam siklus.

3.2.4 Sifat Optik

Semua material memungkinkan beberapa bagian cahaya, meskipun untuk logam sangat kecil. Kecepatan cahaya ketika di dalam material v selalu lebih rendah dibandingkan di ruang hampa c . Konsekuensinya adalah bahwa cahaya yang menimpa permukaan material pada sudut α (sudut insiden). Cahaya yang memasuki material pada sudut β (sudut bias). Indeks bias n tak berdimensi dinyatakan:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Hal ini berkaitan dengan konstanta dielektrik ϵ_d , dengan:

$$n \approx \sqrt{\epsilon_c}$$

Nilai ini tergantung dengan panjang gelombang. Semakin tinggi densitas material dan semakin tinggi konstanta dielektriknya maka semakin besar indeks biasnya. Jika $n = 1$, maka seluruh intensitas insiden memasuki material, tetapi jika $n > 1$, maka beberapa terpantulkan. Jika permukaan halus dan dipoles, itu dipantulkan sebagai balok. Jika permukaan kasar, maka akan menyebar. Persentase yang dipantulkan R , berkaitan dengan indeks bias:

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \times 100$$

Ketika n meningkat, nilai R cenderung menjadi 100 persen.

3.2.5 Sifat Eco

Energi terkandung atau energi produksi adalah energi yang digunakan untuk mengekstrak 1 kg bahan dari biji-bijian atau bahan baku. Satuan yang digunakan adalah MJ/kg. Produksi CO_2 adalah massa karbon dioksida yang dilepaskan ke atmosfer selama produksi 1 kg material dengan satuan kg/kg.

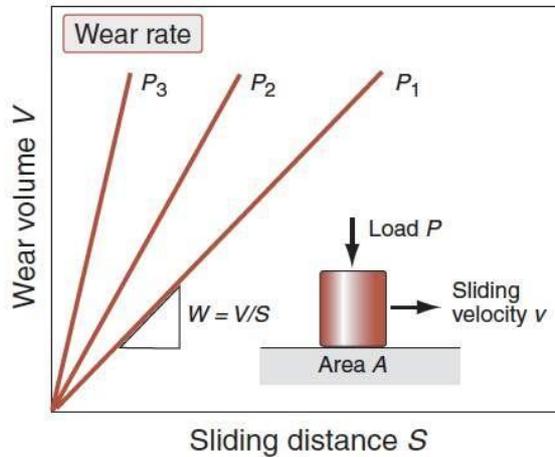
3.2.6 Ketahanan Lingkungan

Beberapa atribut material sulit diukur, terutama yang berkaitan dengan interaksi antara material dan lingkungannya. Ketahanan lingkungan secara konvensional ditandai pada skala 5-titik diskrit: sangat baik, baik, rata-rata, buruk, sangat buruk. "Sangat bagus" berarti bahan ini sangat tahan terhadap lingkungan, "sangat buruk" berarti tidak tahan atau tidak stabil.

Kategorisasi dirancang untuk membantu skrining awal. Informasi pendukung harus selalu dicari jika serangan lingkungan menjadi perhatian. Keausan (wear) adalah masalah multi-bodi. Ketika benda padat meluncur, volume material yang hilang dari suatu permukaan, per jarak unit meluncur, disebut laju keausan W . Ketahanan aus permukaan ditandai dengan konstanta keausan Archard K_A . Satuan ketahanan aus adalah MPa^{-1} .

$$\frac{W}{A} = K_f P$$

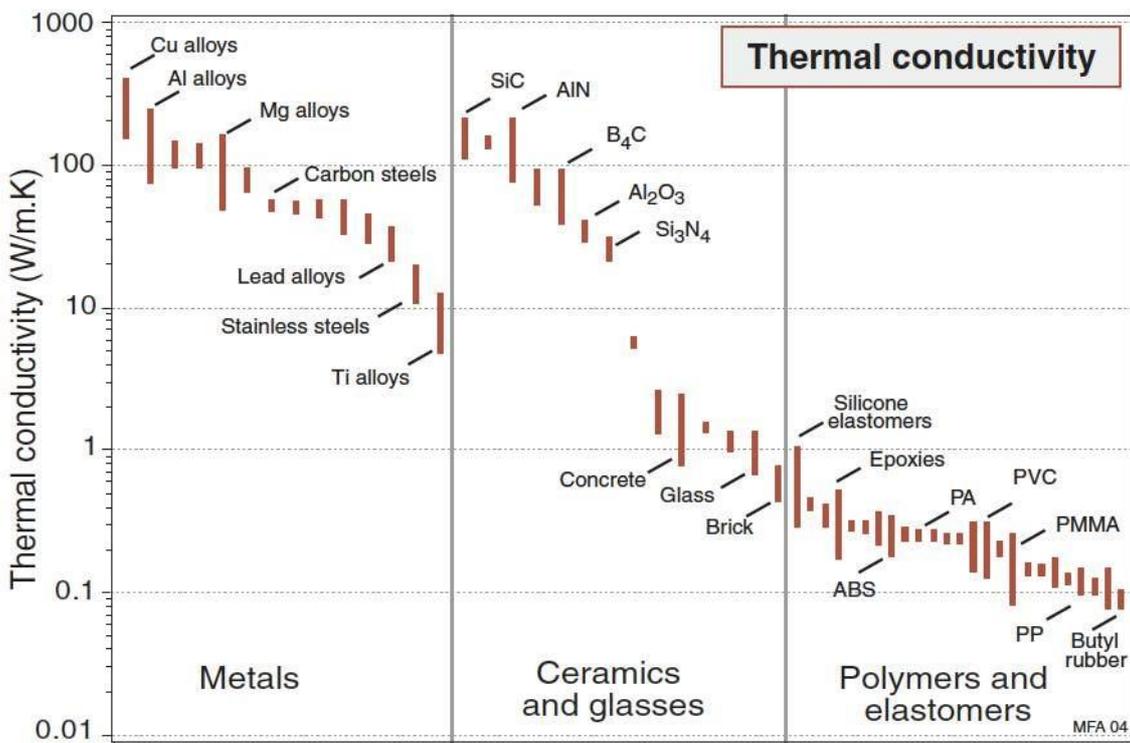
dimana A luasan permukaan dan P adalah gaya normal yang menekan bersama-sama.



Gambar 3.13 Ketahanan aus diukur dengan ARCHARD memakai K_A konstan.

3.3 Diagram Sifat Material

Sifat material membatasi kinerja komponen permesinan. Sifat material dapat ditampilkan pada diagram batang, kinerja komponen tergantung tidak hanya pada satu sifat tetapi kombinasi dari sifat-sifat penting lainnya. itu diperlukan pemetaan sifat material yang dimiliki oleh masing-masing kelas material dan sub bidang material yang ditempati oleh material tunggal.

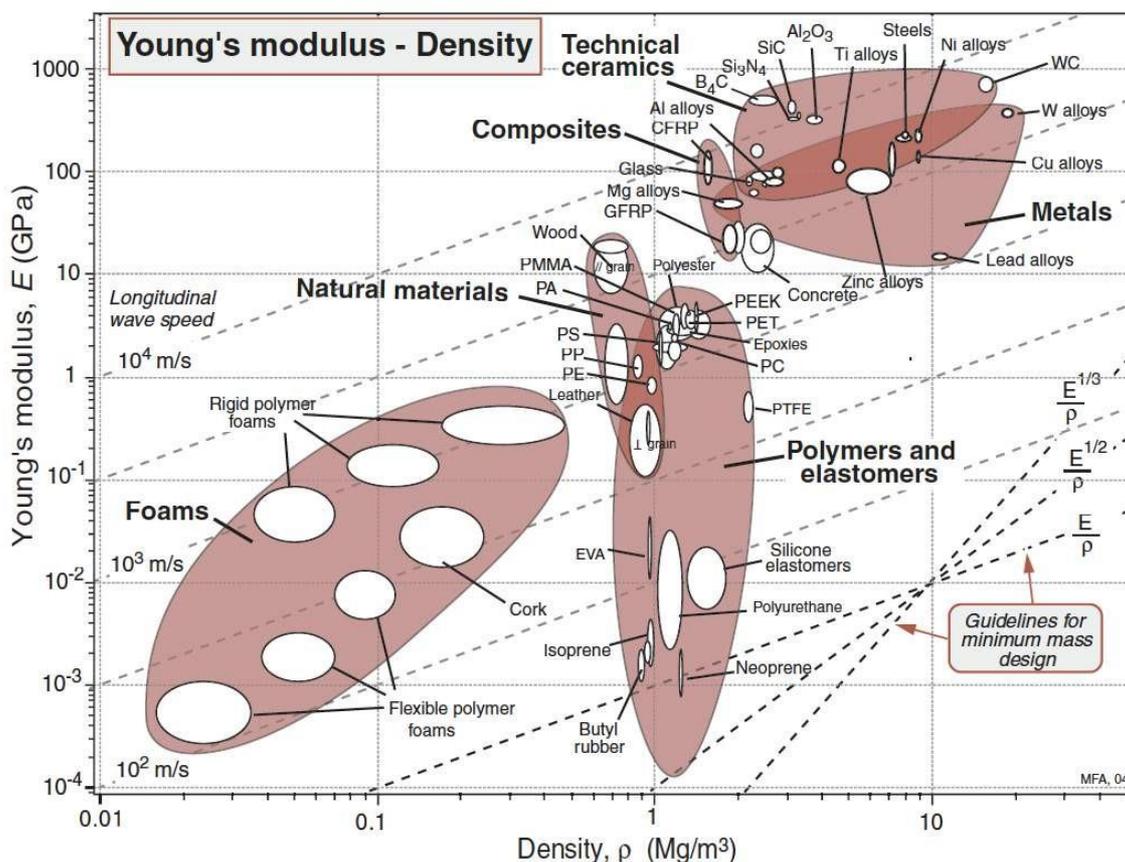


Gambar 3.14 Diagram batang yang menunjukkan konduktifitas panas.

Sifat material teknik memiliki jangkauan karakteristik nilainya. Salah satu cara untuk menampilkan sifat-sifat tersebut adalah dengan menggunakan diagram batang. Setiap batang menunjukkan sifat material tunggalnya. Tinggi batang menunjukkan rentang sifatnya. Setiap kelas material menunjukkan rentang karakteristik: logam yang memiliki konduktivitas tinggi, polimer rendah, keramik memiliki rentang nilai yang luas dari rendah ke tinggi.

3.3.1 Diagram Modulus-Densitas

Modulus dan densitas adalah sifat material yang sangat populer. Baja biasanya kaku, dan karet selalu lentur. Hal ini dipengaruhi oleh nilai modulusnya. Timbal itu berat sedangkan gabus ringan. Hal ini disebabkan oleh nilai densitasnya. Densitas material tergantung pada tiga faktor, yaitu: berat atom atau ion, ukuran atom, dan struktur atomnya. Ukuran atom tidak banyak bervariasi: sebagian besar memiliki volume dalam faktor dua $2 \times 10^{29} \text{ m}^3$. Penyebaran kepadatan terutama berasal dari berat atom, mulai dari 1 untuk hidrogen hingga 238 untuk uranium.



Gambar 3.15 Modulus Young E vs density

Logam lebih padat karena tersusun atas atom atom berat, sedangkan polimer memiliki densitas yang rendah karena tersusun atas karbon (berat atom 12) dan hidrogen (berat atom 1). Keramik memiliki densitas yang lebih rendah daripada logam karena terdiri dari atom yang ringan yaitu O, N, dan C. Modulus material dipengaruhi oleh dua faktor yaitu kekakuan ikatan dan densitas ikatan satuan volume. Modulus Young E dinyatakan dengan:

$$E = \frac{S}{r_1}$$

Dimana, S adalah konstanta pegas (N/m) dan r_0 adalah ukuran atom. Ikatan kovalen memiliki kekakuan ($S = 20 - 200$ N/m), ikatan metalik dan ionik sedikit lebih kecil ($S = 15 - 100$ N/m).

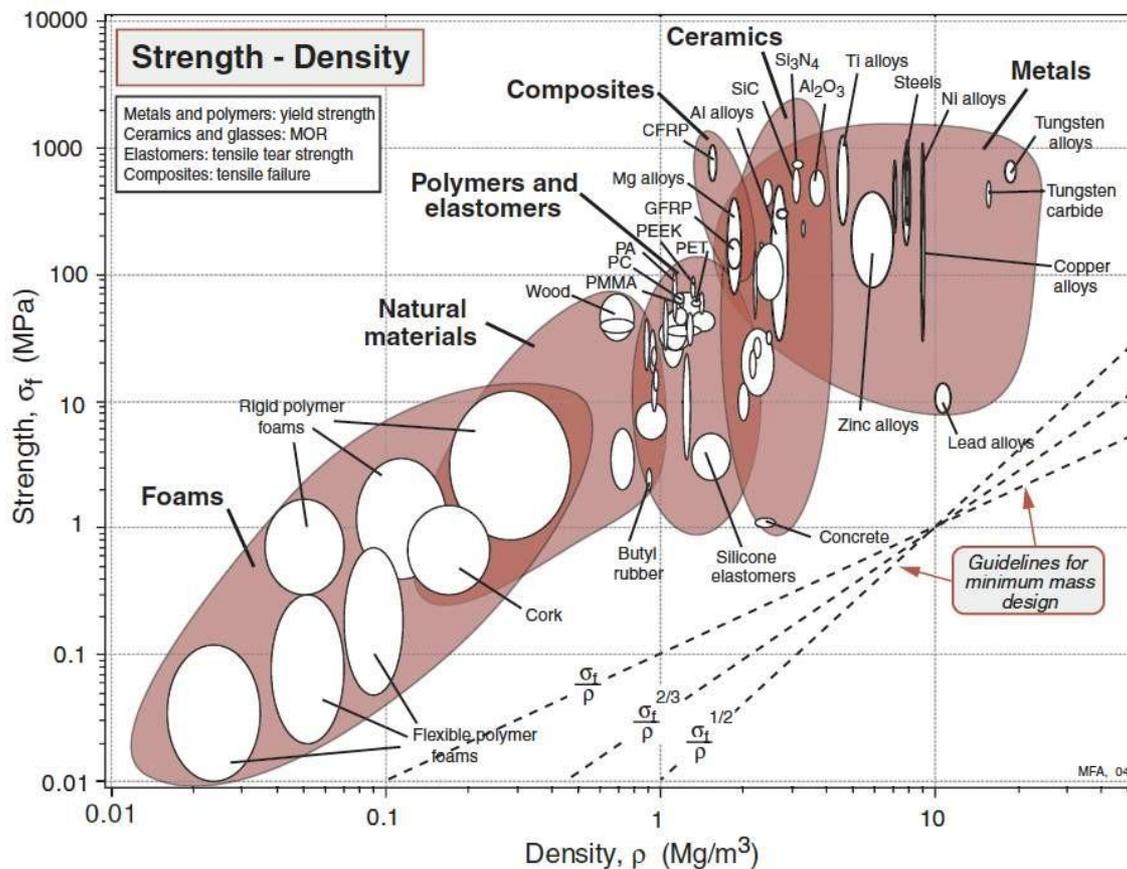
Intan memiliki modulus elastisitas sangat tinggi karena atom karbon sangat kecil sehingga densitas ikatan menjadi tinggi dan atom-atomnya terhubung sangat kuat ($S=200$ N/m). Logam memiliki modulus tinggi karena densitas ikatan tinggi dan ikatannya kuat. Polimer terdiri dari ikatan kuat (seperti ikatan kovalen) dan ikatan lemah (ikatan hydrogen atau Van der Waals) dengan nilai $S = 0.5-2$ N/m. Atom yang besar ($r_0 = 3 \times 10^{-10}$ m) terikat dengan ikatan terlemah dengan $S = 0.5$ N/m memiliki modulus seperti berikut;

$$E = \frac{0.5}{3 \times 10^{-10}} = 1 \text{ GPa}$$

Diagram menunjukkan material teknik berada dalam rentang antara 0.0001 GPa (densitas rendah-gabus) hingga 1000 GPa (intan).

3.3.2 Diagram Kekuatan – Densitas

Kekuatan logam dan polimer adalah kekuatan luluhnya. Untuk keramik rapuh, kekuatannya adalah *modulus rupture* atau kekuatan dalam lentur. Nilai ini sedikit lebih besar dari kekuatan tarik, tetapi jauh lebih kecil dari kekuatan kompresi. Untuk keramik 10-15 kali lebih besar. Kekuatan elastomer berarti kekuatan sobek tarik. Sedangkan kekuatan komposit adalah kekuatan kegagalan tarik. Kekuatan material teknik memiliki modulus dari 0.01 MPa s.d. 10^4 MPa.



Gambar 3.16 Kekuatan vs densitas

3.3.3 Diagram Modulus - Kekuatan

Kekuatan logam dan polimer adalah kekuatan luluhnya. Untuk keramik rapuh, kekuatannya adalah modulus rupture atau kekuatan dalam lentur. Nilai ini sedikit lebih besar dari kekuatan tarik, tetapi jauh lebih kecil dari kekuatan kompresi. Untuk keramik 10-15 kali lebih besar. Kekuatan elastomer berarti kekuatan sobek tarik. Sedangkan kekuatan komposit adalah kekuatan kegagalan tarik. Kekuatan material teknik memiliki modulus dari 0.01 MPa s.d. 10^4 MPa.

Baja tarik tinggi dan karet membuat sifat pegas yang baik. Bagaimana mungkin bahwa dua bahan yang berbeda seperti itu cocok untuk melaksanakan tugas yang sama? Gambar 4.5 menunjukkan plot modulus Young E dan kekuatan f . Polimer memiliki regangan besar antara 0.01 dan 0.1. Nilai logam setidaknya merupakan faktor yang lebih kecil dari 10. Komposit terletak pada kontur 0.01 yang memiliki sifat terbaik seperti logam. Elastomer memiliki modulus sangat rendah dengan nilai f/E lebih besar daripada kelas bahan lainnya, biasanya 1 hingga 10.

Jarak di mana kekuatan antar-atom bertindak kecil—ikatan rusak jika membentang hingga lebih dari sekitar 10 persen dari panjang aslinya. Jadi kekuatan yang diperlukan untuk memecahkan ikatan kira-kira

DASAR-DASAR PEMILIHAN MATERIAL

4.1 Pengantar

Setiap material selalu ditandai dengan: densitas, kekuatan, biaya, ketahanan korosi dan yang lainnya. biasanya permintaan desain selalu menghendaki densitasnya rendah, kekuatannya tinggi, harganya terjangkau, dan tahan terhadap air laut. Dua hal penting dalam pemilihan material adalah:

1. Identifikasi profil material yang diinginkan.
2. Membandingkannya dengan material teknik di lapangan untuk memperoleh kesesuaian yang terbaik.

4.2 Strategi Pemilihan Material

Tahapan pertama adalah translasi yaitu menguji kebutuhan desain untuk mengidentifikasi kendala (*constraint*) sehingga dapat menentukan material yang cocok. Material yang ada di sekitar kita sangat banyak, untuk itu perlu dilakukan pemilihan melalui penyaringan (*screening*) dan pemeringkatan (*ranking*) atas material kandidat yang memiliki kemampuan dan kinerjanya yang maksimal. Kriteria untuk penyaringan dan pemeringkatan diturunkan dari kebutuhan desain setiap komponen dengan melakukan analisis fungsi (*function*), kendala (*constraint*), tujuan (*objective*) dan variabel bebas.



Gambar 4.1 Strategi pemilihan material

4.2.1 Translasi

Setiap komponen keteknikkan selalu memiliki satu fungsi atau lebih, misalnya: mendukung beban, menahan tekanan, dan meneruskan panas. Kondisi ini dapat dicapai dengan menentukan kendalanya, seperti dimensinya yang jelas, mampu menahan beban atau

tekanan tanpa mengalami kegagalan, apakah bersifat isolator atau konduktor, dapat berfungsi pada lingkungan dan rentang suhu tertentu. Seorang desainer mesin harus mempertimbangkan harga yang serendah mungkin, ringan, aman atau kombinasi dari sifat-sifat tersebut. Parameter tertentu dapat disetting untuk optimalisasi tujuan. Seorang desainer harus bebas memilih material untuk komponen tersebut. Fungsi dan kendala, tujuan dan variabel bebas adalah kondisi batas pemilihan material.

Tabel 5.1 Fungsi, kendala, tujuan dan variabel bebas

Function	What does the component do?
Constrains	What nonnegotiable condition must be met?
	What negotiable but desirable condition must be met?
Objective	What is to be maximized or minimized?
Free Variable	Which parameters of the problem is the designer free to change?

4.2.2 Penyaringan: keterbatasan atribut material

Dalam pemilihan material mengharuskan bahwa semua material dianggap sebagai kandidat sampai terbukti sebaliknya. Penyaringan (*screening*) adalah menghilangkan kandidat yang tidak dapat melakukan fungsi sama sekali karena satu atau lebih atribut mereka berada di luar batas yang ditetapkan oleh kendala. Sebagai contoh, jika material harus memiliki persyaratan "komponen harus berfungsi dalam air mendidih", atau "komponen harus transparan" menunjukkan batas yang jelas pada atribut suhu layanan maksimum dan transparansi optik yang harus dipenuhi kandidat material.

4.2.3 Peringkat: indeks material

Kriteria optimasi ditentukan dengan indeks material yang mengukur seberapa baik kandidat yang telah melalui penyaringan. Kinerja material kadang-kadang dibatasi oleh satu atau kombinasi sifatnya. Misalnya, pelampung memerlukan densitas (ρ) dan konduktifitas termal yang terendah (λ). Untuk heat exchanger, maka dibutuhkan konduktifitas termal yang terbesar. Dengan memaksimalkan atau meminimalkan satu properti dapat memaksimalkan kinerja. Ada kalanya performa material tidak hanya dibatasi oleh satu sifat saja, tetapi kombinasi dari beberapa sifat. Misalnya kabel, yang harus memiliki kekuatan tinggi dan bobot yang ringan. Kombinasi dari kedua sifat ini adalah kekuatan spesifik yaitu σ_f/ρ , dimana σ_f kekuatan patah. Penyaringan akan mengisolasi kandidat yang mampu melakukan fungsi desain, pemeringkatan untuk mengidentifikasi material yang paling mampu menjalankan fungsi desain. Misal

4.2.4 Informasi Pendukung

Hasil dari langkah-langkah sejauh ini adalah daftar pendek kandidat yang memenuhi kendala dan yang memaksimalkan atau meminimalkan kriteria keunggulan. Informasi pendukung sangat berbeda dari data properti terstruktur yang digunakan untuk penyaringan. Biasanya berbentuk deskriptif, grafis atau pictorial dari studi kasus

penggunaan bahan sebelumnya, rincian perilaku korosi di lingkungan tertentu, informasi ketersediaan dan harga, pengalaman dampak lingkungan.

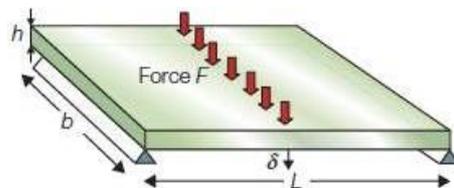
4.2.5 Kondisi lokal

Pilihan akhir antar kandidat sangat tergantung pada kondisi lokal, seperti: keahlian atau peralatan dan ketersediaan pemasok lokal. Keputusan harus didasarkan pada pengetahuan lokal. Hal ini bukan berarti bahwa hasil dari prosedur sistematis tidak relevan. Mengetahui bahan mana yang terbaik tetap menjadi prioritas, meskipun jika akhirnya keputusan tersebut tidak digunakan karena alasan lokal.

4.3 Indeks Material

Kendala (constrain) menetapkan batasan sifat material. Sedangkan tujuan (objective) menentukan indeks material, di mana kita dapat mencari nilai-nilai ekstrem. Ketika tujuan tidak dapat bertemu dengan kendala, maka indeks material adalah sifat material sederhana. Jika keduanya dapat digabungkan maka dapat digunakan indeks yang menjadi sekelompok sifat material.

Pembebanan pada komponen biasanya dapat diurai atas tegangan aksial, lentur, torsi, dan kompresi. Nama fungsional adalah cara pembebanan: balok dan panel mengalami momen lentur, poros mengalami torsi, dan kolom menerima beban aksial tekan. Balok, poros dan kolom adalah FUNGSI. Energi dan emisi dalam sistem transportasi didominasi oleh bahan bakar. Semakin ringan sistem dibuat, semakin hemat konsumsi bahan bakar dan semakin sedikit karbon yang dihasilkan. Jadi titik awal desain yang baik adalah berat minimum.



Gambar 4.2 Komponen panel yang dibebani lentur.

4.3.1 Meminimalkan massa

Panel yang ringan dan kuat. Panel adalah lempengan datar, seperti meja. Panjang L dan lebar b ditentukan tetapi ketebalannya bebas. Ketika ada beban terpusat F maka akan mengalami lenturan. Kendala kekakuan mengharuskan tidak terjadi defleksi melebihi δ . Tujuan desain adalah untuk mencapai massa minimum. Secara singkat dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini:

Tabel 4.2 Kebutuhan desain pada panel yang ringan dan kaku

Function	Panel
Constrains	Kekakuan lentur S ditentukan (functional constrain) Panjang dan lebar ditentukan (geometric constrain)
Objective	Minimize mass m panel
Free Variable	Ketebalan panel h Pemilihan material

Langkah pertama adalah persamaan yang menyatakan kuantitas untuk memaksimalkan atau meminimalisir, maka massa yang harus ditentukan. Persamaan tersebut disebut sebagai fungsi tujuan (*the objective function*).

$$m = AL\rho = bhL\rho$$

Kekakuan lentur S adalah minimal S*:

$$S = \frac{C_1 EI}{L^3} \geq S^*$$

C₁ adalah konstanta yang tergantung pada distribusi pembebanan (lihat lampiran B pada buku Ashby). Momen luasan kedua pada komponen yang berbentuk segiempat adalah:

$$I = \frac{1}{12} bh^3$$

Ketebalan dapat dikurangi dengan catatan kekakuan panel masih aman. Dengan menggunakan 2 persamaan terakhir untuk mengurangi ketebalan, maka fungsi tujuan adalah:

$$m = \left(\frac{12S^*}{C_1 b} \right)^{\frac{1}{3}} (bL^2) \left(\frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}} \right)$$

$$\left(\frac{12S^*}{C_1 b} \right)^{\frac{1}{3}} \rightarrow \text{functional constraint}$$

$$(bL^2) \rightarrow \text{geometric constraint}$$

Nilai S*, L, b, dan C₁ ditentukan. Satu-satunya kebebasan pilihan yang tersisa adalah pemilihan material. Indeks adalah kelompok sifat material. Material terbaik untuk panel yang ringan dan kaku adalah:

$$M_{p1} = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

Perhitungan dengan kendala kekuatan memberikan indeks:

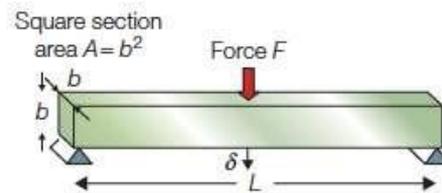
$$M_{p1} = \frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho}$$

4.3.2 Meminimalisir Volume

Balok ringan dan kaku. Balok memiliki banyak bentuksegiempat solid, tabung silindris, balok I dan sebagainya. Pertama, perlu dilakukan idetifikasi material yang paling optimum untuk balok yang kaku dan ringan. Kedua, seberapa ringan dapat dibuat dengan kekakuan yang sama dengan bentuk yang efisien. Jika balok berbentuk persegi maka:

$$m = AL\rho = b^2L\rho$$

Kekakuan lentur S adalah minimal S*:



Gambar 4.3 Komponen balok yang dibebani lentur

$$S = \frac{C_2 EI}{L^3} \geq S^*$$

C_2 adalah konstanta yang tergantung pada distribusi pembebanan (lihat lampiran B pada buku Ashby). Momen luasan kedua pada komponen yang berbentuk segiempat adalah:

$$I = \frac{b^4}{12} = \frac{A^2}{12}$$

Tabel 4.3 Kebutuhan desain pada balok yang ringan dan kaku

Function	Balok
Constrains	Panjang L ditentukan (<i>geometric constraint</i>) Bentuk persegi (<i>geometric constraint</i>) Balok menahan beban lentur F tanpa defleksi berlebih, kekakuan lentur S ditentukan S^* (<i>functional constraint</i>)
Objective	Minimize mass m balok
Free Variable	Luas penampang A Pemilihan material

Maka akan diperoleh:

$$m = \left(\frac{12S^*L^3}{C_2} \right)^{\frac{1}{2}} (L) \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right)$$

Nilai S^* , L, b, dan C_2 ditentukan. Material terbaik untuk balok yang ringan dan kaku dengan nilai indeks terbesar adalah:

$$M_{b1} = \frac{E^{1/2}}{\rho}$$

Perhitungan dengan kendala kekuatan memberikan indeks:

$$M_{p1} = \frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$$

4.3.3 Meminimalisir Biaya Material.

Ketika tujuannya meminimalisir harga, maka indeks material akan berubah. Fungsi tujuan untuk biaya material panel dan balok adalah:

$$C = mC_m = AL\rho C_m$$

Jika C_m adalah harga material per kg, maka indeks panel adalah:

$$M_{p1} = \frac{E^{1/3}}{\rho C_m}$$

Elemen struktural adalah komponen yang melakukan fungsi fisik, seperti membawa beban, meneruskan panas, menyimpan energi dan sebagainya. Komponen tersebut harus memenuhi persyaratan fungsional. Kinerja elemen struktural ditentukan oleh tiga hal, yaitu: persyaratan fungsional, geometri, dan sifat-sifat materi. Kinerja P elemen dijelaskan dengan persamaan:

$$P = [(persyaratan fungsional, F), (parameter geometris, G), (sifat material, M)]$$

atau:

$$P = f(F, G, M)$$

di mana P adalah metrik kinerja yang menjelaskan beberapa aspek kinerja komponen, seperti massa, volume, biaya, atau umur materialnya. Desain optimum adalah pemilihan bahan dan geometri yang memaksimalkan atau meminimalkan P, sesuai dengan keinginannya. Ketika fungsi saling terpisah maka persamaan menjadi:

$$P = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$$

di mana f_1 , f_2 , dan f_3 adalah fungsi terpisah yang dikalikan bersama-sama.

1. Tie rod: bobot minimum, kekakuan ditetapkan

$$M = \frac{E}{\rho}$$

2. Balok: bobot minimum, kekakuan ditetapkan

$$M = \frac{Ez^1}{\rho}$$

3. Balok: bobot minimum, kekuatan ditetapkan

$$M = \frac{\sigma^{\frac{2}{3}}}{\rho}$$

4. Balok: biaya minimum, kekakuan ditetapkan

$$M = \frac{Ez^1}{\rho C_m}$$

5. Balok: biaya minimum, kekuatan ditetapkan

$$M = \frac{\sigma^{\frac{2}{3}}}{\rho C_m}$$

6. Kolom: biaya minimum, beban tekuk ditetapkan

$$M = \frac{Ez^1}{\rho C_m}$$

7. Pegas: bobot minimum, penyimpanan energi ditetapkan

$$M = \frac{\sigma_y^2}{E\rho}$$

8. Isolasi panas: biaya minimum, fluks panas ditetapkan

$$M = \frac{1}{\lambda\rho C_p}$$

9. Electromagnetic: medan magnet maksimum, peningkatan suhu ditetapkan

$$M = \frac{\rho C_p}{\rho_e}$$

Di mana ρ = densitas, E = modulus Young, σ_y = batas elastisitas, C_m = harga/kg, λ = konduktivitas termal, ρ_e = resistivitas listrik, C_p = panas spesifik.

4.4 Prosedur Pemilihan

Langkah-langkah prosedur material dapat dilalui dengan 4 tahapan secara sistematis, yaitu translasi, penyaringan, perangkaan, dan dokumentasi.

4.4.1 Translasi dan Penurunan Indeks Material.

Secara singkat translasi dapat dilakukan dengan tindakan berikut ini.

1. Mendefinisikan persyaratan desain:
 - a. Fungsi: apa tugas komponen yang dirancang?
 - b. Kendala: persyaratan penting yang harus dikompromikan: kekuatan, kekakuan, ketahanan korosi, karakteristik pembentukan.
 - c. Tujuan: apa yang dapat dimaksimalkan atau diminimalkan?
 - d. Variable bebas: manakah variable yang bukan kendala masalah?
2. Membuat daftar kendala (tidak luluh, tidak buckling) dan mengembangkan persamaan untuk itu.
3. Mengembangkan persamaan untuk tujuan persyaratan fungsional, geometri, dan sifat material (fungsi tujuan).
4. Mengidentifikasi variable bebas.
5. Mengganti variable bebas dari persamaan kendala ke fungsi tujuan.
6. Kelompokkan variable ke dalam persyaratan fungsi F, geometri G, dan sifat material M.

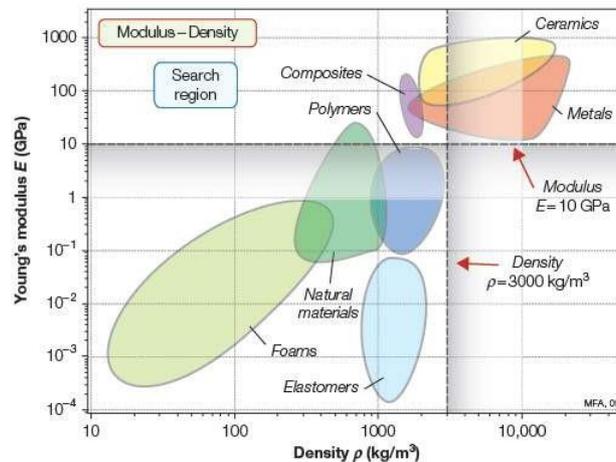
Performa metric $P \leq f_1(F). f_2(G). f_3(M)$

Performa metric $P \leq f_1(F). f_2(G). f_3(M)$
7. Membaca indeks material, menyatakan sebagai nilai M yang mengoptimalkan metric kinerja P. M adalah kriteria excellent.

4.4.2 Screening: menerapkan batasan atribut

Setiap desain memiliki tuntutan tertentu yang tidak dapat dinegosiasikan ("kendala") pada material yang digunakan. Plot batasan atribut sebagai garis tegak atau mendatar pada diagram sifat material. Jika desain menentukan batasan pada $E > 10$ GPa dan $\rho < 3000$ kg/m³. Area optimal dibatasi dengan garis kotak dengan tulisan "search region". Sifat yang kurang dapat diukur seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, atau kemampuan dibentuk dapat muncul

sebagai batas dengan bentuk: $A > A^*$ atau $A < A^*$. A adalah atribut (layanan suhu) dan A^* adalah nilai kritis atribut dengan ketentuan “harus melebihi” atau “tidak boleh melebihi”.



Gambar 4.4 Diagram skema $E - \rho$

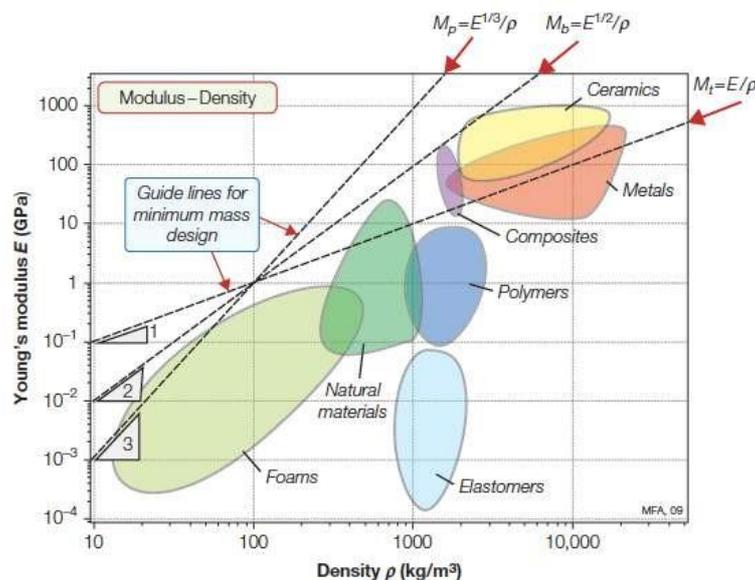
4.4.3 Ranking: Indeks pada diagram

Langkah selanjutnya adalah mencari subset material yang memenuhi batasan sifat dan material yang memaksimalkan kinerja. Kita akan menggunakan desain komponen yang ringan dan kaku. Gambar 4.5 menunjukkan plot modulus E dengan densitas ρ pada skala log. Indeks material E/ρ , $E^{1/2}/\rho$, dan $E^{1/3}/\rho$ dapat diplot ke dalam diagram sifat material. Kondisi tersebut adalah:

$$\frac{E}{\rho} = C$$

atau:

$$\text{Log}(E) = \text{Log}(\rho) + \text{Log}(C)$$



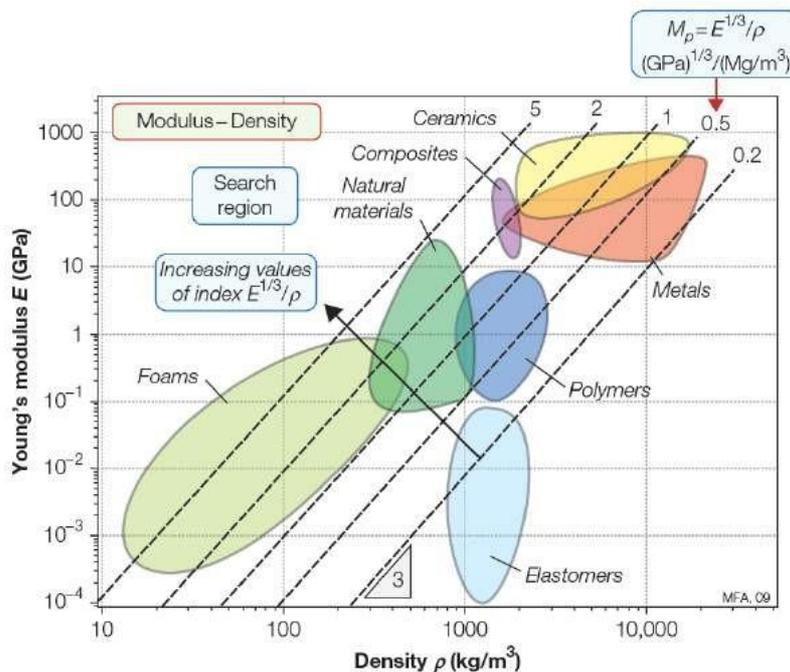
Gambar 4.5 Diagram skema yang menunjukkan indeks material untuk desain dengan bobot kecil

$$\frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho} = C$$

atau:

$$\text{Log}(E) = 2 \text{Log}(\rho) + 2 \text{Log}(C)$$

Sekarang mudah untuk membaca material subset yang secara optimal memaksimalkan kinerja untuk setiap geometri pembebanan. Semua material yang terletak pada garis konstanta $E^{1/3}/\rho$ memiliki performa yang baik pada panel yang ringan dan kaku. Yang berada di atas garis akan lebih baik dan yang di bawah garis lebih buruk. Gambar 5.6 menunjukkan bahwa grid garis yang sesuai dengan nilai $E^{1/3}/\rho$ dari 0,2 hingga 5 $\text{GPa}^{1/3}/(\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3})$. Sebuah material panel dengan $M = 2$ memiliki sepersepuluh berat material dengan $M = 0.2$ pada kekakuan balok yang sama. Subset material dengan nilai indeks yang sangat baik diidentifikasi dengan memilih garis yang mengisolasi area pencarian yang berisi sejumlah kecil kandidat, seperti yang ditunjukkan Gambar 5.7. Batas atribut dapat ditambahkan atau mempersempit jendela pencarian. Yang sesuai dengan $E > 50 \text{ GPa}$ adalah yang ditampilkan sebagai garis horizontal. Material yang berada di wilayah pencarian memenuhi kedua kriteria.



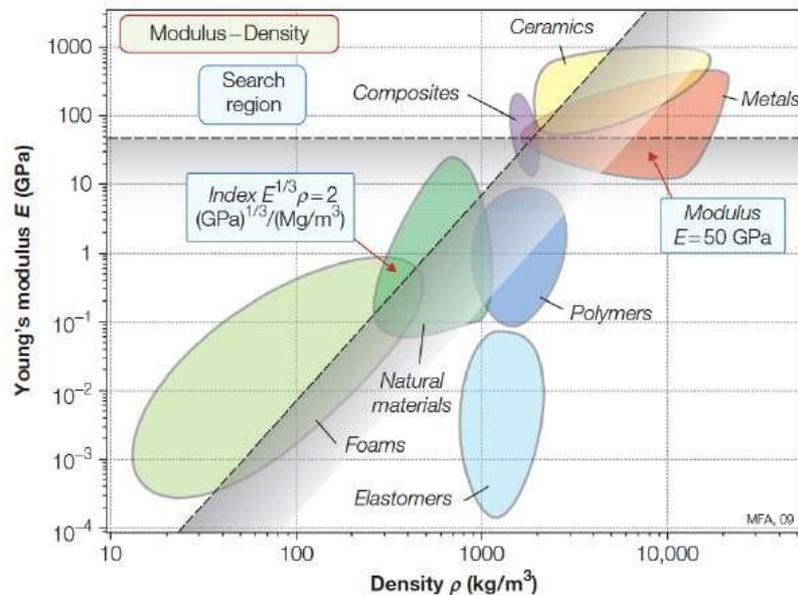
Gambar 4.6 Diagram skema $E - \rho$ yang menunjukkan grid garis untuk indeks material, $M = E^{1/3}/\rho$

4.4.4 Dokumentasi

Langkah terakhir adalah mengeksplorasi karakter material secara mendalam. Daftar kendala biasanya berisi beberapa yang tidak dapat dinyatakan sebagai batas atribut sederhana. Banyak kendala yang berhubungan dengan perilaku material dalam lingkungan tertentu atau aspek-aspek cara material dapat dibentuk, digabung, atau difinishing.

Informasi tersebut dapat ditemukan di buku pegangan, lembar data produsen dan sumber berbasis komputer. Kepercayaan diri dibangun dengan mencari pedoman desain, studi kasus,

atau analisis kegagalan yang mendokumentasikan setiap kandidat, kekuatan dan kelemahan dan metode mengatasinya.



Gambar 5.7 Basis pemilihan indeks $M = E^{1/3}/\rho > 2 \text{ (GPa)}^{1/3}$ dengan $E > 50 \text{ GPa}$

4.5 Pemilihan Material Bantuan Komputer

Software CES adalah perangkat lunak untuk pemilihan material dengan bantuan komputer. Database berisi catatan material yang diatur berdasarkan hirarki. Setiap rekaman berisi data atribut material terstruktur. Software CES berisi dokumentasi terbatas dalam bentuk teks, gambar, dan referensi ke sumber informasi material. Data ditelusik oleh mesin pencari yang menawarkan pencarian secara skematik (Gambar 5.8). Di sebelah kiri adalah antarmuka kueri sederhana untuk penyaringan properti tunggal. Batas atas atau bawah atribut yang diinginkan diinput. Mesin pencari akan menolak semua material dengan atribut yang terletak di luar batas yang ditentukan. Bagan bagian tengah adalah cara kedua untuk menelusik data, seperti diagram batang.

Diagram batang dan bagan gelembung pada Gambar 5.8 (kanan) adalah cara untuk menerapkan batasan dan peringkat. Penggunaan peringkat, garis pemilihan atau kotak pilihan ditumpangkan pada grafik dengan tepi yang terletak pada nilai “kendala” atribut, menghilangkan material di area yang diarsir dan menyisakan material yang memenuhi semua kendala.

4.6 Indeks Struktur

Efisiensi penggunaan material dalam komponen yang dibebani secara mekanis tergantung pada tiga faktor: indeks material, faktor bentuk, dan indeks struktural. Pemilihan material dan proses difokuskan pada indeks material dan bentuk.

- a. Efisiensi desain untuk tie rod yang ringan:

$$\frac{m}{L^3} \geq \left(\frac{F^*}{L^2} \right) \left(\frac{\rho}{\sigma_f} \right)$$

b. Efisiensi desain untuk panel yang ringan:

$$\frac{m}{L^3} \geq \left(\frac{12}{C_1}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{b^2 S^*}{L^3}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho}{E^{\frac{1}{3}}}\right)$$

c. Efisiensi desain untuk balok yang ringan:

$$\frac{m}{L^3} \geq \left(\frac{12}{C_2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{S^*}{L}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho}{E^{\frac{1}{2}}}\right)$$

Nilai m/L^3 memiliki dimensi densitas. Semakin rendah pseudodensitas ini semakin ringan struktur dan semakin besar efisiensi struktural. Istilah yang dikurung pada sisi kanan adalah konstanta dan disebut indeks material. Istilah dalam tanda kurung yang tengah adalah indeks struktur. Ini memiliki dimensi tegangan yang merupakan ukuran intensitas pembebanan. Proporsi desain yang optimal adalah meminimalkan penggunaan material, optimal untuk struktur berbagai ukuran memiliki indeks struktural yang sama.

KASUS STUDI PEMILIHAN MATERIAL

Pada bab ini akan diuraikan berbagai macam studi kasus dalam pemilihan material pada komponen tertentu. Setiap studi kasus ditata dengan cara berikut:

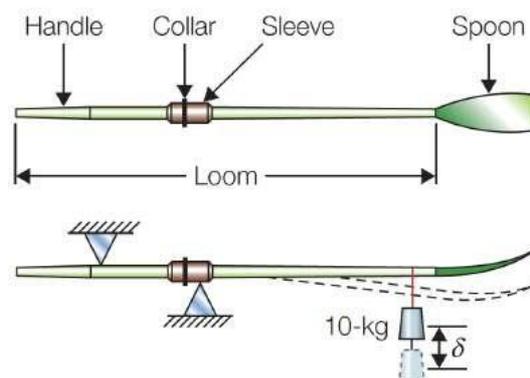
1. Pernyataan masalah: pengaturan latar belakang.
2. Translasi: mengidentifikasi fungsi, kendala, tujuan, dan variabel bebas, dari mana muncul batas atribut dan indeks material.
3. Pemilihan: di mana menu material lengkap dikurangi dengan penyaringan dan pemeringkatan ke daftar kandidat material yang layak.
4. Postscript, memungkinkan komentar tentang hasil dan filsafat

5.1 Material Dayung

Perahu dayung pertama dibangun oleh Mesir. Perahu dengan dayung muncul dalam relief pada monumen Mesir antara 3300 dan 3000 SM. Perahu, sebelum tenaga uap, dapat didorong oleh poling, dengan berlayar, atau dengan dayung.

Balapan dayung dilaksanakan di Thames (London) dan meluas ke tahun 1716. Stimulus nyata untuk pengembangan perahu dan dayung dimulai tahun 1900 menjadikan dayung sebagai olahraga olimpiade. Sejak saat itu keahlian dan material mengalami perkembangan pesat.

Translasi. Secara mekanika, dayung adalah batang balok yang dibebani beban lentur. Bahan tersebut harus cukup kuat untuk membawa beban tanpa patah. Dayung harus cukup kaku dan nyaman dipegang. Desain dayung harus kaku yang memberikan defleksi elastis tertentu di bawah pembebanan tertentu.



Gambar 5.1 Dayung didesain kaku dan ringan

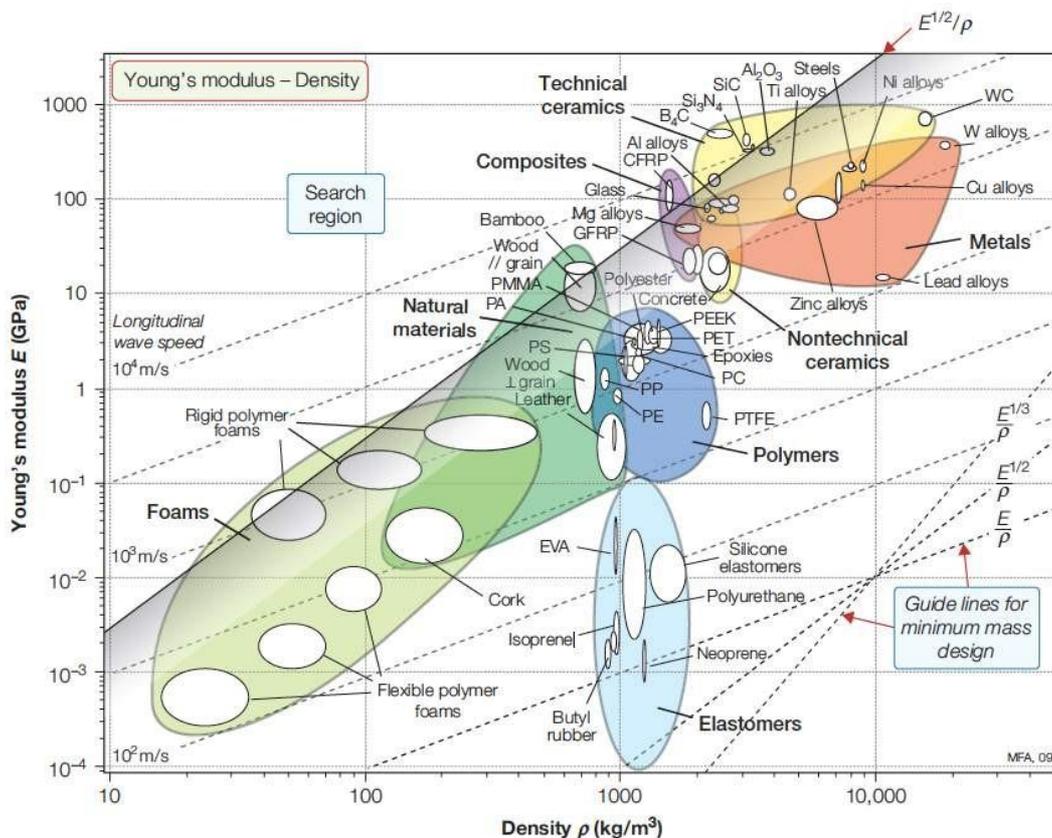
Gambar 5.1 menunjukkan dayung dengan bentuk pisau atau "sendok" yang terikat pada poros. Gambar sebelah bawah menunjukkan bagaimana kekakuan dayung diukur: beban 10 kg digantung pada dayung 2,05 m dari kerah dan defleksi δ pada titik ini diukur. Dayung lunak akan melentur hampir 50 mm dan dayung kaku hanya 30 mm.

Dayung harus ringan. Berat berlebih akan meningkatkan area lambung yang dibasahi dan hambatan yang terjadi dengannya. Maka persyaratan desain adalah dayung yang kaku, dibatasi defleksinya dengan berat minimum. Untuk dayung yang ringan dan kaku, maka indeks materialnya:

$$M = \frac{E^{1/2}}{\rho}$$

Tabel 5.1 Persyaratan desain dayung	
Fungsi	Dayung-balok ringan dan kaku
Kendala	Panjang L dibatasi Kekakuan lentur S dibatasi Ketangguhan, $G_{1c} > 1 \text{ kJ/m}^2$
Tujuan	Meminimalisir massa m
Variabel bebas	Diameter poros Pemilihan material

Pemilihan. Gambar 5.2 menunjukkan grafik modulus Young yang diplot dengan densitas. Garis seleksi untuk indeks M memiliki kemiringan 2 sehingga sekelompok kecil bahan yang tersisa di atasnya.



Gambar 5.2 Material untuk dayung. CFRP lebih baik daripada kayu karena strukturnya dapat dikendalikan.

Material yang berada di atas garis dengan nilai terbesar M dan mewakili pilihan terbaik selama kendala terpenuhi. Material terpilih terdiri dari 3 kelas:: kayu, polimer yang diperkuat karbon, dan keramik. Sifat keramik rapuh. Rekomendasinya jelas, untuk dayung adalah CFRP.

Postscript. Dayung balap dan sculls terbuat dari kayu atau komposit kinerja tinggi: epoxy yang diperkuat serat karbon. Poros dan pisau dibuat dari cemara Sitka yang dapat ditemukan di Amerika Serikat bagian utara atau Kanada. Semakin jauh ke utara semakin baik karena musim tanam pendek memberikan biji-bijian yang lebih halus. Kayu dipotong menjadi strip, empat di antaranya dilaminasi bersama-sama membentuk kekakuan rata-rata, dan pisau direkatkan ke poros. Dayung kasar kemudian disimpan selama beberapa minggu hingga stabil, dan diberikan finishing dengan pemotongan tangan dan polishing. Setelah finishing, dayung cemara memiliki berat antara 4 dan 4,3 kg.

Bilah komposit sedikit lebih ringan daripada kayu pada kekakuan yang sama. Bagian komponen dibuat dari campuran serat karbon dan kaca dalam matriks epoxy, dirakit dan direkatkan. Keuntungan komposit adalah memiliki bobot yang lebih kecil (berat 3.9 kg). Sampai hari ini, biaya dayung CFRP lebih mahal daripada kayu. Bisakah kita melakukan yang lebih baik? Grafik menunjukkan bahwa kayu dan CFRP menawarkan dayung paling ringan, setidaknya ketika metode konstruksi normal digunakan.

Tabel 5.2 Material untuk dayung

Material	Indeks $M \text{ (GPa)}^{1/2}$ atau Mg/m^3	Comment
Bamboo	4.0 – 4.5	Material tradisional untuk dayung atau kano (perahu kecil dan sempit)
Wood	3.4 – 6.3	Tidak mahal, tradisional, variabilitas natural
CFRP	5.3 – 7.9	Seperti kayu, sifat material lebih terkontrol
Ceramic	4.0 – 8.9	Nilai M bagus tetapi ketangguhan rendah dan biayanya tinggi

5.2 Material Flywheel

Flywheels berfungsi untuk menyimpan energi. Flywheel yang kecil-kecil banyak ditemukan dalam mainan anak-anak yang terbuat dari timah. Mesin uap tua dan mobil modern memiliki flywheels juga yang terbuat dari besi cor. Flywheels juga digunakan untuk penyimpanan daya dan sistem pengereman regeneratif untuk kendaraan. Material yang digunakan berasal dari baja berkekuatan tinggi, komposit, timbal, dan besi cor. Apa pilihan bahan terbaik untuk flywheel?

Flywheel yang efisien menyimpan energi sebanyak mungkin per satuan berat. Sebagai flywheel berputar, meningkatkan kecepatan sudut ω dan menyimpan energi lebih banyak. Jika tegangan sentrifugal melebihi kekuatan tarik flywheel, maka akana melayang terpisah. Jadi kekuatan menetapkan batas atas pada energi yang dapat disimpan.

Flywheel untuk mainan anak-anak tidak efisien karena kecepatan sudutnya dibatasi oleh daya tarik anak-anak dan tidak pernah mendekati kecepatan semburan dari jarak jauh. Flywheel pada mesin mobil, energi yang disimpan dapat dimaksimalkan pada kecepatan sudut tertentu

di flywheel dengan jari-jari luar, R, yang dibatasi oleh ukuran rongga di mana flywheel didudukkan.

Tujuan dan kendala dalam desain flywheel tergantung pada tujuannya. Dua set alternatif persyaratan desain tercantum dalam Tabel 5.3(a) dan 5.4(b).

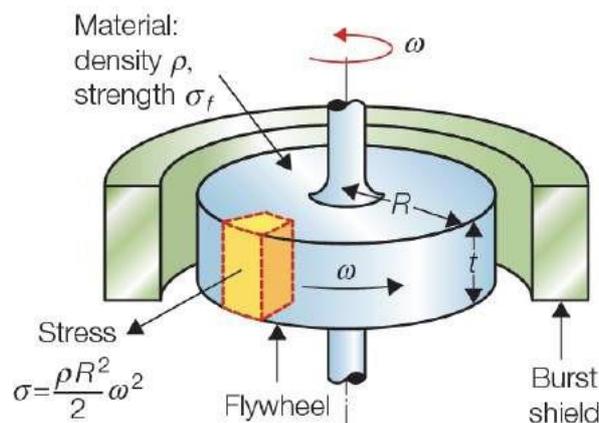
Tabel 5.3 Persyaratan desain untuk flywheel berenergi maksimum

Fungsi	Flywheel untuk penyimpanan energi
Kendala	Radius luar R tetap Tidak boleh meledak Ketangguhan yang memadai untuk memberikan toleransi retak
Tujuan	Memaksimalkan energi kinetis per satuan massa
Variabel bebas	Pemilihan material

Tabel 5.4 Persyaratan desain untuk kecepatan tetap

Fungsi	Flywheel untuk mainan anak-anak
Kendala	Radius luar R tetap
Tujuan	Memaksimalkan energi kinetis per satuan volume pada kecepatan sudut tetap
Variabel bebas	Pemilihan material

Translasi. Flywheel efisien dari jenis pertama dapat menyimpan energi sebanyak mungkin energi per satuan berat, tanpa gagal. Anggap saja, flywheel sebagai disk padat dengan radius R dan ketebalan t, berputar dengan kecepatan sudut ω (Gambar 5.3).



Gambar 5.3 Flywheel, dapat menyimpan energi kinetik maksimum dibatasi oleh kekuatan

Energi U yang disimpan dalam flywheel (Lampiran B) adalah:

$$U = \frac{1}{2} J \omega^2$$

$$J = \frac{\pi^2}{2} \rho R^4 t$$

J adalah momen inersia polar disk dan ρ adalah densitas material yang digunakan, dan memberikan nilai:

$$U = \frac{\pi}{4} \rho R^4 t \omega^2$$

Massa disk adalah:

$$m = \pi R^2 t \rho$$

Kuantitas yang harus dimaksimalkan adalah energi kinetik per satuan massa, yang merupakan rasio dari dua persamaan terakhir:

$$\frac{U}{m} = \frac{1}{4} R^2 \omega^2$$

Ketika flywheel berputar, energi yang tersimpan di dalamnya meningkat, begitu juga tegangan sentrifugalnya. Tegangan utama maksimum pada disk berputar dengan ketebalan seragam (Lampiran B) adalah:

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{3 + \nu}{8} \right) \rho R^2 \omega^2 \approx \frac{1}{2} \rho R^2 \omega^2$$

di mana ν adalah rasio Poisson ($\nu \approx 1/3$). Tegangan ini tidak boleh melebihi tegangan gagal σ_f (dengan faktor keamanan yang tepat, di sini dihilangkan). Hal ini untuk menetapkan batas atas produk pada kecepatan sudut, ω , dan radius disk, R (variabel bebas). Menghilangkan R antara dua persamaan terakhir memberikan:

$$\frac{U}{m} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_f}{\rho}$$

Material terbaik untuk flywheels berkinerja tinggi adalah bahan dengan nilai indeks material yang tinggi:

$$M = \frac{\sigma_f}{\rho}$$

Dengan satuan kJ/kg.

Flywheel untuk mainan anak-anak ditentukan dengan kemampuan menyimpan energi paling banyak per satuan volume V pada kecepatan konstan, ω . Energi per satuan volume pada ω tertentu adalah:

$$\frac{U}{V} = \frac{1}{4} \rho R^2 \omega^2$$

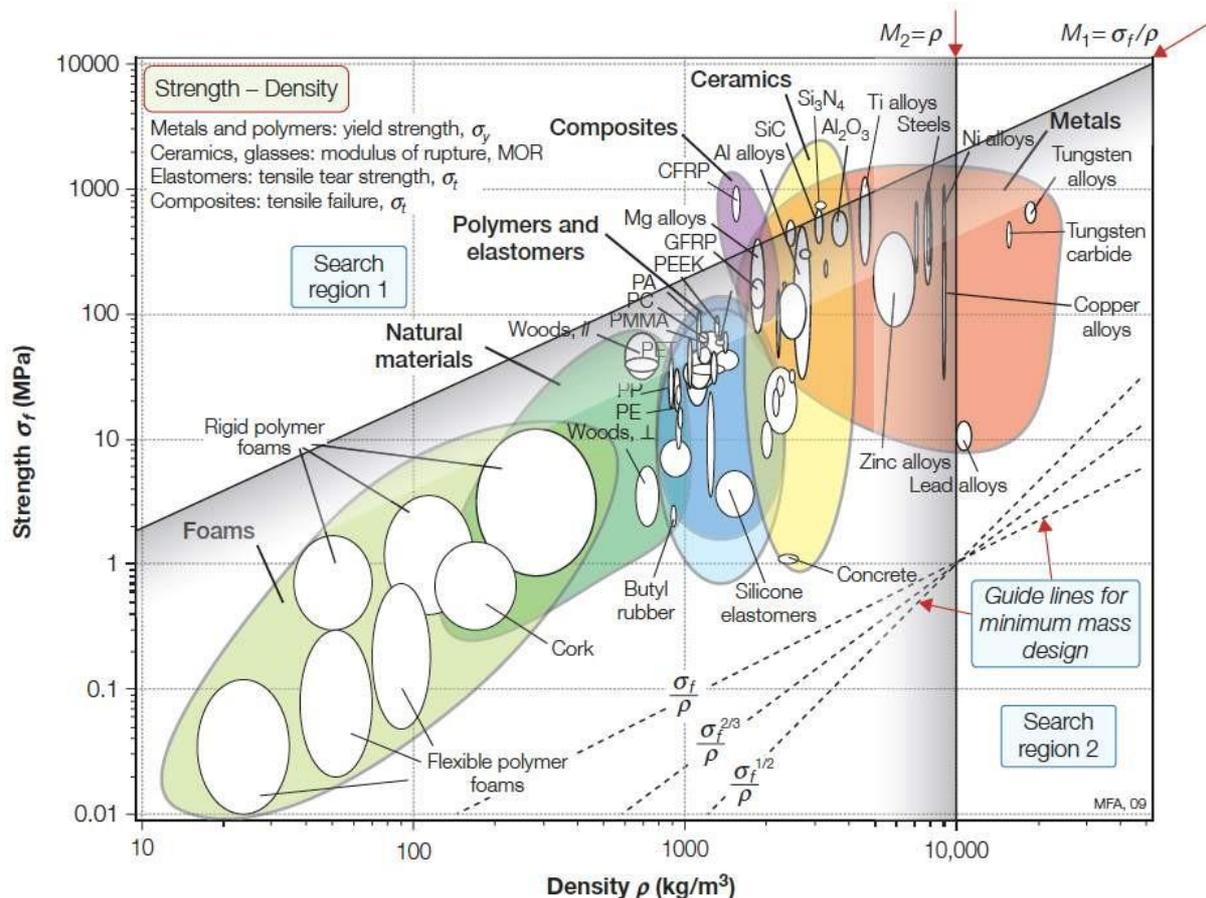
R dan ω ditetapkan dengan desain, sehingga material terbaik yang memiliki nilai M terbesar, yaitu:

$$M_2 = \rho$$

Pemilihan. Gambar 5.4 menunjukkan grafik massa jenis - kekuatan. Nilai M_1 sesuai dengan kisi garis kemiringan 1. Salah satunya diplot sebagai garis diagonal dengan nilai $M_1 = 200$ kJ/kg. Material kandidat dengan nilai tinggi M_1 terletak di wilayah pencarian 1, yang berada di arah kiri atas. Pilihan terbaik adalah yang tak terduga: komposit, terutama CFRP, paduan titanium berkekuatan tinggi, dan beberapa keramik, tetapi ini dikesampingkan oleh ketangguhannya yang rendah.

Tapi bagaimana dengan flywheels pada mainan anak-anak? Hampir tidak mungkin ada dua material yang lebih berbeda dari CFRP: satu, kuat dan ringan. Kedua: lembut dan berat.

Hal ini karena dalam mainan anak, memiliki kendala yang berbeda. Kecepatan sudut ω dibatasi oleh mekanisme penggerak (*pull string, friction drive*). Material terbaik adalah material dengan kepadatan terbesar. Garis pilihan kedua pada Gambar 5.4 menunjukkan indeks M_2 pada nilai 10.000 kg/m^3 . Pilihan berikutnya adalah di wilayah pencarian 2 berada di sebelah kanan garis. Timbal itu bagus, tungsten lebih baik, tapi lebih mahal. Besi cor kurang bagus, tetapi lebih murah. Emas, platinum, dan uranium (tidak ditampilkan pada grafik) adalah yang terbaik dari semua, tetapi mungkin dianggap tidak cocok untuk alasan lain.



Gambar 5.4 Material flywheel. Komposit adalah pilihan terbaik. Timbal dan besi cor adalah material tradisional memiliki performa bagus ketika dibatasi oleh kecepatan rotasional, tetapi tidak cukup kuat.

Postscript. Rotor CFRP mampu menyimpan sekitar 400 kJ/kg. Sebuah flywheel timbal hanya dapat menyimpan 1 kJ/kg. Flywheel besi cor sekitar 30 kJ/kg. Nilai tersebut jauh jika dibandingkan energi dari bensin sekitar 20.000 kJ/kg. Disk harus dikelilingi oleh perisai peledak dan kontrol kualitas yang tepat dalam proses manufaktur untuk menghindari gaya yang tidak setimbang. Kondisi ini dicapai dalam sejumlah flywheels komposit penyimpan energi yang digunakan dalam truk dan bus, dan sebagai reservoir energi untuk menghaluskan pembangkit listrik tenaga angin.

Mobil hibrida gas-listrik sudah ada di jalan, menggunakan teknologi baterai canggih untuk menyimpan energi. Berat bodi membatasi kisaran dan kinerja mobil. Hal ini praktis untuk membangun flywheels dengan kepadatan energi sekitar setara dengan baterai terbaik.

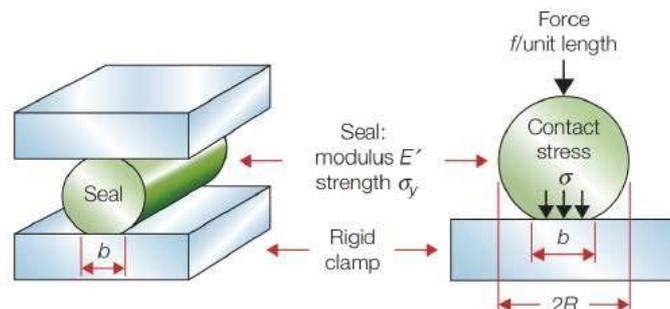
Pertimbangan sekarang adalah flywheel untuk mobil listrik. Sepasang disk CFRP *counter-rotating* ditempatkan di perisai baja anti pecah. Magnet tertanam dalam disk melalui kumparan dalam *housing*, menginduksi arus dan memungkinkan daya untuk ditarik ke motor listrik yang menggerakkan roda.

Tabel 5.4 Energy density of power sources

Source	Energy density, kJ/kg	Comment
Gasoline	20,000	Oxidation of hydrocarbon—mass of oxygen not included
Rocket fuel	5,000	Less than hydrocarbons because oxidizing agent forms part of fuel
Flywheel	Up to 400	Attractive, but not yet proved
Lithium-ion battery	Up to 350	Expensive, limited life
Nickel-cadmium batter	170-200	Less expensive than lithium-ion
Lead-acid battery	50-80	Large weight for acceptable range
Springs, rubber bands	Up to 5	Much less efficient method of energy storage than flywheel

5.3 Material Seal

Seal elastis yang dapat digunakan kembali terdiri dari silinder bahan yang dikompresi antara dua permukaan datar (Gambar 5.5). Segel harus membentuk selebar mungkin kontak b , tegangan kontak σ cukup rendah sehingga tidak merusak permukaan. Segel harus tetap elastis sehingga dapat digunakan berkali-kali. Bahan apa yang cocok untuk pembuatan segel adalah elastomers. Tetapi mungkin akan dijumpai material segel yang lebih baik. Persyaratan desain segel dapat ditunjukkan oleh Tabel 5.5.



Gambar 5.5 An elastic seal. A good seal gives a large conforming contact area without imposing damaging loads on itself or on the surfaces with which it mates.

Translasi. Silinder dengan diameter $2R$ dan modulus E ditekan pada permukaan datar yang kaku dengan gaya f per satuan panjang, membentuk kontak elastis dengan lebar b (Lampiran B) di mana:

$$b \approx 2.3 \left(\frac{fR}{E} \right)^{1/2}$$

Tabel 5.5 Persyaratan desain untuk segel elastis

Fungsi	Seal elastis
Kendala	Limit on contact pressure Low cost
Tujuan	Maximum conformability to surface
Variabel bebas	Choice of material

Ini adalah kuantitas yang harus dimaksimalkan: fungsi tujuan. Tegangan kontak, baik pada segel maupun permukaan, dapat digunakan untuk memperkirakan (Lampiran A) dengan:

$$\sigma \approx 0.57 \left(\frac{fE}{R} \right)^{1/2}$$

Kendalanya: Segel harus tetap elastis, yaitu σ harus kurang dari kekuatan luluh atau gagalanya σ_f dari bahan seal. Menggabungkan dua persamaan terakhir dengan kondisi ini memberikan:

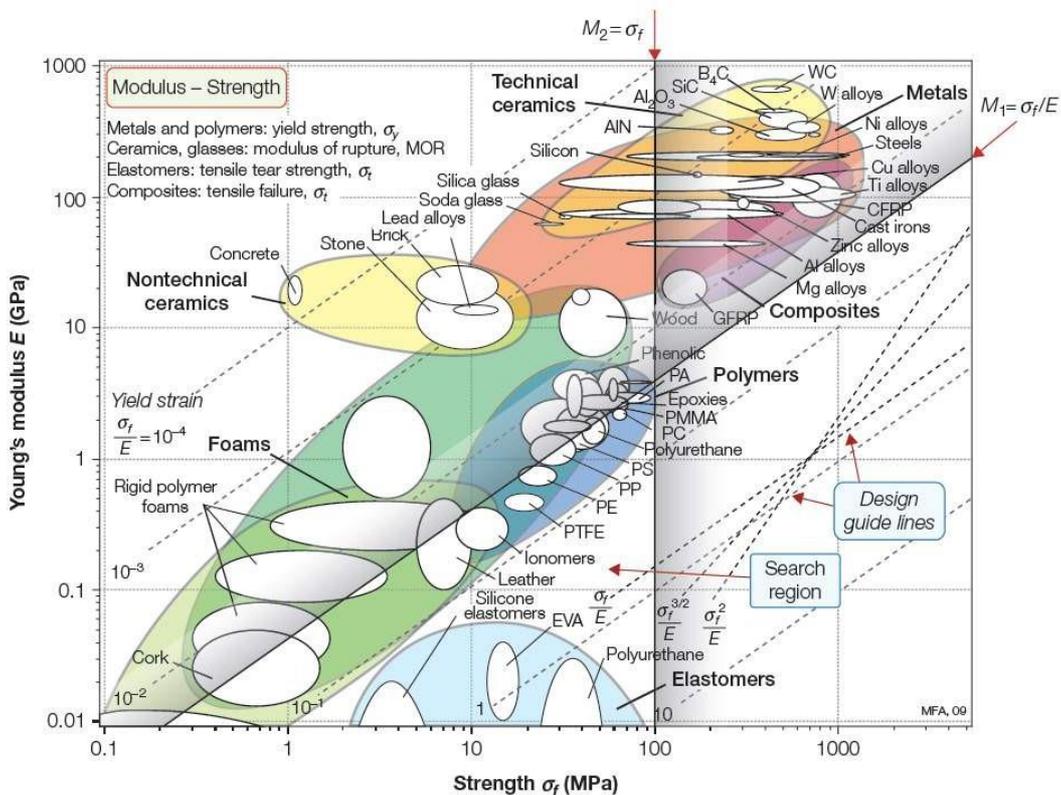
$$b \leq 4.0R \left(\frac{\sigma_f}{E} \right)$$

Lebar kontak dimaksimalkan dengan memaksimalkan nilai indeks:

$$M_1 = \frac{\sigma_f}{E}$$

Hal ini juga diperlukan bahwa tegangan kontak σ dijaga rendah untuk menghindari kerusakan pada permukaan datar. Nilainya ketika gaya kontak maksimum diterapkan (untuk memberikan lebar terbesar) hanya kekuatan kegagalan segel σ_f . Misalkan permukaan datar rusak oleh tegangan lebih besar dari 100 MPa, maka tekanan kontakannya adalah:

$$M_2 = \sigma_f \leq 100 \text{ MPa}$$



Gambar 5.6 Material untuk seal elastis. Elastomer, polimer dan busa untuk seal yang baik.

Pemilihan. Kedua indeks diplot pada grafik $\sigma_f - E$ pada Gambar 5.6, mengisolasi elastomer, busa, dan gabus. Material kandidat tercantum dalam Tabel 5.6. Nilai $M_2 = 100$ MPa menunjukkan semua elastomers sebagai kandidat. Jika M_2 dikurangi menjadi 10 MPa, selain elastomer dapat dihilangkan, dan polimer berbuisa menjadi taruhan terbaik.

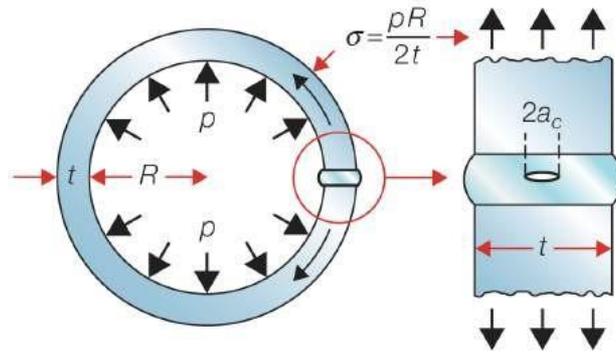
Postscript. Yang harus digarisbawahi adalah fungsi segel: luasan area kontak besar, tekanan kontak terbatas, stabilitas lingkungan. Elastomer memaksimalkan area kontak; busa dan gabus meminimalkan tekanan kontak; PTFE dan karet silikon terbaik tahan panas dan pelarut organik. Pilihan akhir tergantung pada kondisi di mana segel akan digunakan.

Tabel 5.6 Material untuk seal

Material	$M_1 = \frac{\sigma_f}{E}$	Comment
Elastomeric EVA	0.7 – 1.0	Pilihan alami; ketahanan terhadap panas dan beberapa pelarut buruk.
Polyurethanes	2.0 – 5.0	Banyak digunakan secara luas.
Silicone rubbers	0.2 – 0.5	Kapabilitas temperature lebih tinggi daripada elastomer rantai karbon, inert secara kimia
PTFE	0.05 – 0.10	Mahal tetapi secara kimia stabil dan kapabel pada suhu tinggi.
Polyethylene	0.02 – 0.05	Inexpensive but liable to take a permanent set
Polypropylene	0.2 – 0.04	Inexpensive but liable to take a permanent set
Nylon	0.02 – 0.03	Dekat batas atas pada tekanan kontak
Cork	0.03 – 0.06	Tegangan kontak rendah, stabil secara kimia
Polymer foam	Up to 0.03	Tekanan kontak sangat rendah, segel halus

5.4 Bejana Bertekanan

Bejana bertekanan mulai dari aerosol hingga yang paling besar boiler dirancang demi keamanan hingga meluluh atau bocor sebelum pecah. Bejana bertekanan ukuran kecil biasanya dirancang untuk memungkinkan meluluh pada tekanan masih terlalu rendah yang menyebabkan bejana bertekanan retak. Distorsi yang disebabkan oleh peluluhan mudah dideteksi dan tekanan dapat dilepaskan dengan aman. Desain yang aman dicapai dengan memastikan bahwa retakan terkecil yang merambat secara tidak stabil yang memiliki panjang lebih besar dari ketebalan dinding bejana. Kebocoran mudah terdeteksi, dan pelepasan tekanan secara bertahap dan aman (Tabel 5.7). Kedua kriteria tersebut mengarah pada indeks material yang berbeda.



Gambar 5.7 Bejana bertekanan yang memiliki retakan.

Translasi. Tegangan pada dinding bejana tekanan bulat berdinding tipis dengan radius R (Gambar 5.7) adalah:

$$\sigma = \frac{pR}{2t}$$

Dalam desain bejana bertekanan, ketebalan dinding t bekerja pada tekanan kerja p . Tekanan ini kurang dari kekuatan luluh dinding σ_f . Bejana bertekanan ukuran kecil dapat diperiksa secara ultrasonic, atau dengan metode X-ray untuk menetapkan bahwa tidak ada retakan atau cacat lebih besar dari $2a_c$. Tegangan yang diperlukan agar retakan dapat merambat yaitu:

$$\sigma = \frac{CK_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}}$$

di mana C adalah konstanta dan K_{Ic} adalah ketangguhan patahan regangan bidang. Keamanan konstruksi dapat dicapai dengan memastikan bahwa tegangan kerja kurang dari nilai ini:

$$p \leq \frac{2t K_{Ic}}{R \sqrt{\pi a_c}}$$

Tekanan terbesar (untuk R , t , dan a_c) dilakukan pada material dengan nilai terbesar:

$$M_1 = K_{Ic}$$

Tapi desain ini tidak failsafe. Keamanan lebih tinggi diperoleh dengan memastikan bahwa retakan tidak akan merambat jika tegangan mencapai tegangan luluhnya. Kondisi ini dinyatakan dengan persamaan:

$$\pi a_c \leq C^2 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2$$

Ukuran retak yang dapat ditoleransi dimaksimalkan dengan memilih bahan dengan nilai terbesar:

$$M_2 = \frac{K_{Ic}}{\sigma_y}$$

Bejana bertekanan ukuran besar tidak selalu dapat diuji dengan sinar-X atau sonically. Retakan dapat merambat perlahan karena korosi atau pembebanan siklik, sehingga pemeriksaan tunggal pada awal masa pakai tidak cukup. Keselamatan dapat dipastikan dengan mengatur bahwa retakan cukup besar untuk menembus permukaan dalam dan luar bejana masih stabil, karena kebocoran yang disebabkan oleh retakan dapat dideteksi. Hal ini dicapai dengan menetapkan $a_c = t/2$. Keselamatan dipastikan jika stres selalu kurang dari atau sama dengan

$$\sigma = \frac{CK_{1c}}{\sqrt{\frac{\pi t}{2}}}$$

Ketebalan dinding t dari bejana bertekanan dirancang untuk tekanan p tanpa menghasilkan peluluhan. Hal ini berarti:

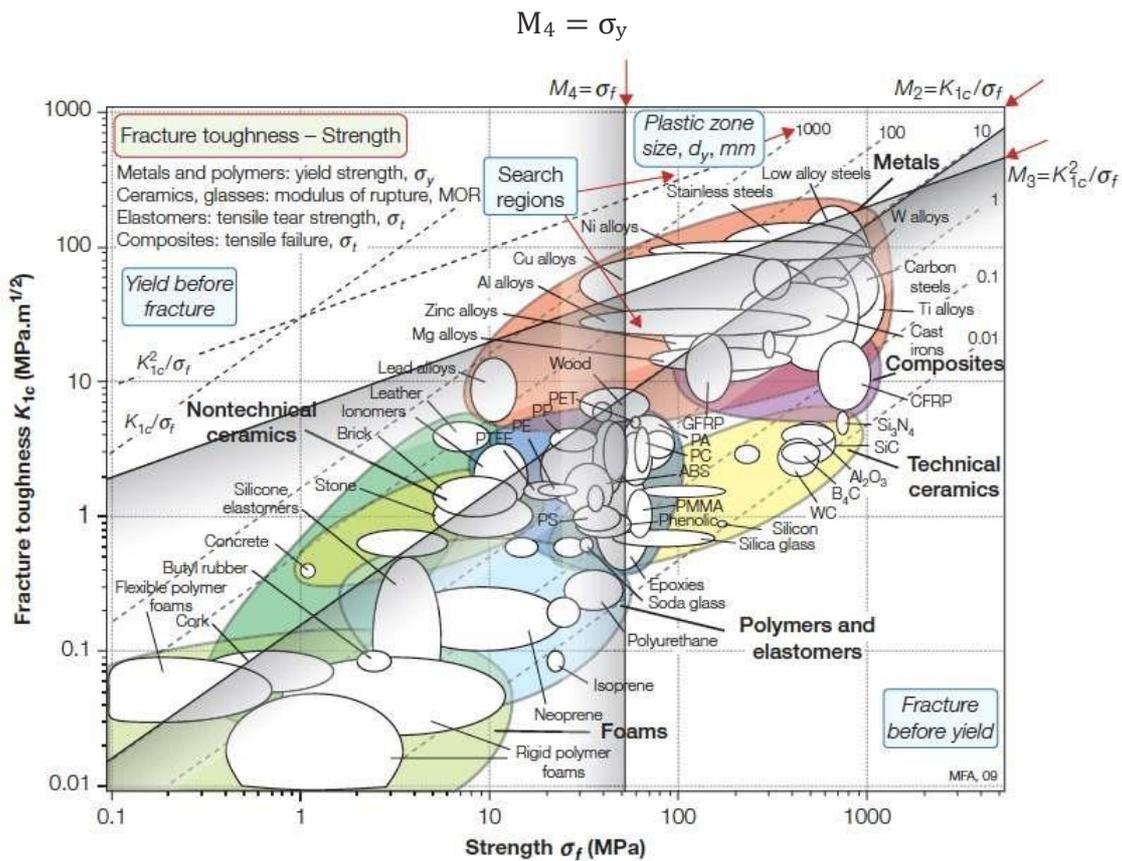
$$t \geq \frac{pR}{2\sigma_y}$$

$$p \leq \frac{4}{\pi} \frac{C^2}{R} \left(\frac{K_{1c}^2}{\sigma_y} \right)$$

Tekanan maksimum paling aman dimiliki oleh material dengan nilai terbesar:

$$M_3 = \frac{K_{1c}^2}{\sigma_y}$$

M_2 dan M_3 dapat diperbesar dengan membuat kekuatan luluh dinding σ_y sangat kecil: timbal memiliki nilai M_2 dan M_3 tinggi, tetapi tidak dapat dipilih untuk material bejana bertekanan. Hal ini dikarenakan dinding bejana harus tetap tipis agar hemat bahan dan tetap ringan. Dinding paling tipis diperoleh dengan kekuatan luluh terbesar σ_y . Dengan demikian dimaksimalkan nilai kekuatan luluhnya.



Gambar 5.8 Material untuk bejana bertekanan. Baja, paduan tembaga, dan paduan aluminium paling memenuhi kriteria "luluh sebelum patah". Kekuatan luluh yang tinggi memungkinkan tekanan kerja yang tinggi. Material di segitiga "search region" adalah pilihan terbaik.

Pemilihan. Kriteria pemilihan ini dieksplorasi menggunakan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.7. Indeks M_1 , M_2 , M_3 dan M_4 muncul sebagai garis kemiringan 0, 1, dan 1/2, dan sebagai garis yang vertikal. Garis diagonal yang sesuai dengan nilai konstan $M_2 = K_{1c}/\sigma_y$ menghubungkan material dengan kinerja yang sama, di atas garis akan lebih baik. Garis yang ditunjukkan pada gambar pada nilai M_1 sesuai dengan zona proses ukuran 10 mm, tidak termasuk semuanya kecuali baja terberat, tembaga, aluminium, dan paduan titanium, meskipun beberapa polimer (PP, PE, dan PET). Kriteria kebocoran sebelum terjadinya patah:

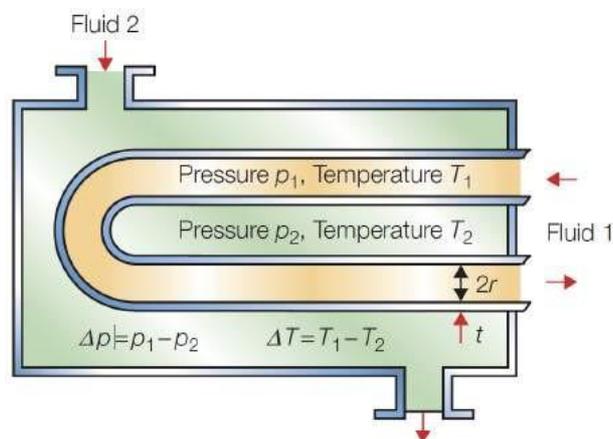
$$M_3 = \frac{K_{1c}^2}{\sigma_y}$$

Baja paduan rendah, stainless dan baja karbon lebih kuat. Polimer tidak lagi memenuhi syarat sebagai kandidat.

Tabel 5.7 Material untuk bejana bertekanan

Material	$M_2 = \frac{K_{1c}}{\sigma_y}$	$M_3 = \sigma_y$	Komentar
Baja tahan karat	0.35	300	Bejana bertekanan nuklir terbuat dari stainless steel kelas 316
Baja paduan rendah	0.20	800	Nilai standar pada penerapan ini
Tembaga	0.50	200	Tembaga yang ditarik keras digunakan untuk boiler kecil dan bejana bertekanan
Paduan aluminium	0.15	200	Tangki tekanan roket adalah aluminium
Paduan titanium	0.13	800	Baik untuk bejana bertekanan ringan, tapi mahal

Postscript. Bejana bertekanan besar selalu terbuat dari baja. Mesin uap terbuat dari tembaga. Tembaga dipilih meskipun lebih mahal, karena ketahanan korosinya lebih baik. Hilangnya 0,1 mm melalui korosi bukan masalah serius dalam bejana bertekanan yang tebal 10 mm. Jika hanya setebal 1 mm, itu menjadi perhatian.



Gambar 5.9 Heat exchanger

5.5 Material Heat Exchanger

Penukar panas mengambil panas dari satu cairan dan meneruskannya ke tempat lain (Gambar 5.9). Susunan tabung api dari mesin uap adalah penukar panas, mengambil panas dari gas pembakaran dari kotak api dan mengirimkannya ke air di boiler. Jaringan tabung bersirip di AC adalah penukar panas, mengambil panas dari udara ruangan dan membuangnya ke dalam cairan kerja kondisioner. Elemen kunci dalam semua penukar panas adalah dinding tabung atau membran yang memisahkan dua cairan. Hal ini diperlukan untuk mengirimkan panas, dan sering ada perbedaan tekanan di atasnya.

Pertimbangan material untuk penukar panas adalah konduksi-terbatas exchanger dengan perbedaan tekanan substansial antara dua cairan, salah satunya mengandung ion klorida (air laut)? Perhatikan Tabel 5.8 di bawah ini:

Fungsi	Heat exchanger
Kendala	Menahan perbedaan tekanan Δp Menahan ion klorida Suhu pengoperasian hingga 150°C Biaya sederhana
Tujuan	Maksimalkan aliran panas per satuan luas (penukar volume minimum), atau Memaksimalkan aliran panas per satuan massa (penukar massa minimum)
Variabel bebas	Ketebalan dinding tabung, t Pilihan bahan

Translasi. Perpindahan panas dari satu cairan, melalui membran ke cairan kedua, melibatkan perpindahan konvektif dari cairan 1 ke dinding tabung, konduksi melalui dinding, dan konveksi lagi untuk mentransfernya ke cairan 2. Fluks panas ke dinding tabung dengan konveksi (W/m^2) dijelaskan oleh persamaan transfer panas:

$$q = h_1 \Delta T_1$$

Konduksi dijelaskan oleh persamaan konduksi (atau Fourier), yaitu:

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{t}$$

Kontinuitas fluks panas mensyaratkan bahwa resistensi total $1/U$ adalah:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{h_2}$$

dimana U adalah koefisien perpindahan panas total. Fluks panas dari fluida 1 ke fluida 2 dirumuskan dengan:

$$q = U(T_1 - T_2)$$

Ketika salah satu cairan adalah gas seperti AC, perpindahan panas konvektif di permukaan tabung berkontribusi besar terhadap resistensi; kemudian sirip digunakan untuk meningkatkan luas permukaan di mana panas dapat ditransfer. Tetapi ketika kedua fluida kerja cair, perpindahan panas konvektif cepat dan konduksi melalui dinding mendominasi ketahanan termal; $1/h_1$ dan $1/h_2$ dapat diabaikan dibandingkan dengan t/λ . Dalam hal ini, elemen tabung atau pelat yang digunakan, membuat dinding setipis mungkin untuk meminimalkan t/λ .

Penukar panas dengan n tabung panjang L, masing-masing radius r dan ketebalan dinding t. Pemilihan material untuk memaksimalkan aliran panas total:

$$Q = qA = \frac{A\lambda}{t} \Delta T$$

$$Q = \frac{2\pi rLn\lambda}{t} \Delta T$$

Ini adalah fungsi objektif. Kendalanya adalah ketebalan dinding harus cukup untuk mendukung tekanan Δp antara bagian dalam dan luar, seperti pada Gambar 5.9. Hal ini mensyaratkan bahwa tegangan pada dinding masih di bawah batas elastis σ_y yaitu:

$$\sigma = \frac{\Delta p r}{t} \leq \sigma_y$$

Formula ini membatasi nilai minimum t sehingga diperoleh:

$$Q = \frac{A\Delta T}{r\Delta p} (\lambda\sigma_y)$$

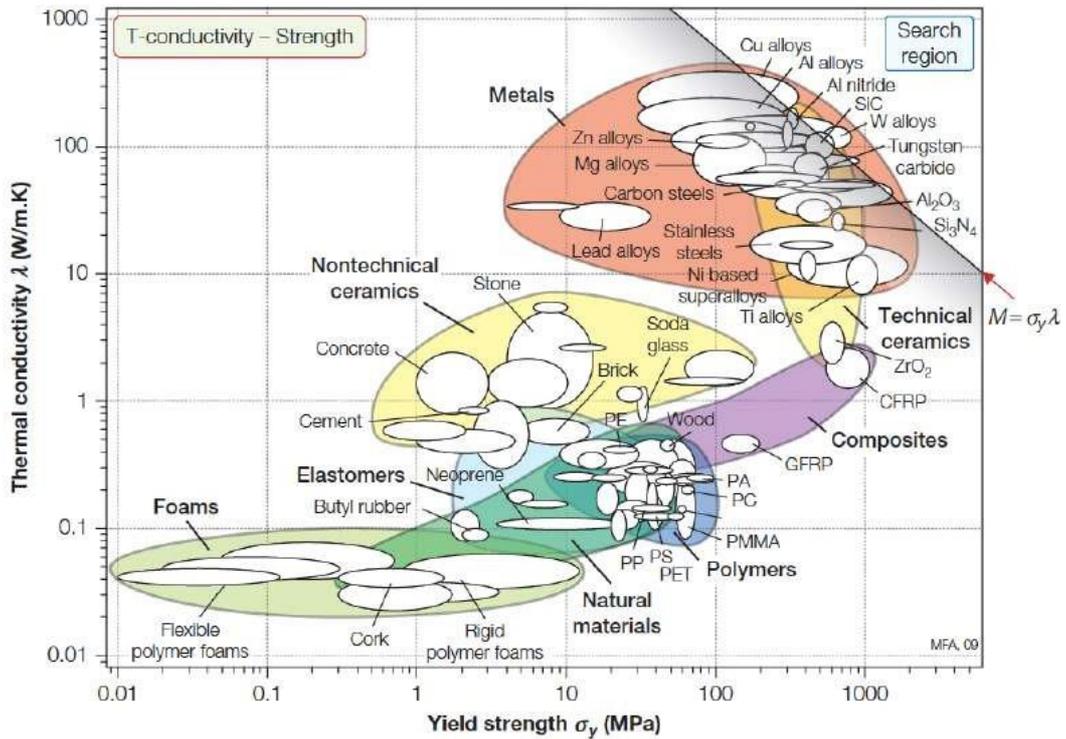
Aliran panas per satuan luas pada dinding tabung Q/A , dimaksimalkan dengan memaksimalkan:

$$M_1 = \lambda\sigma_y$$

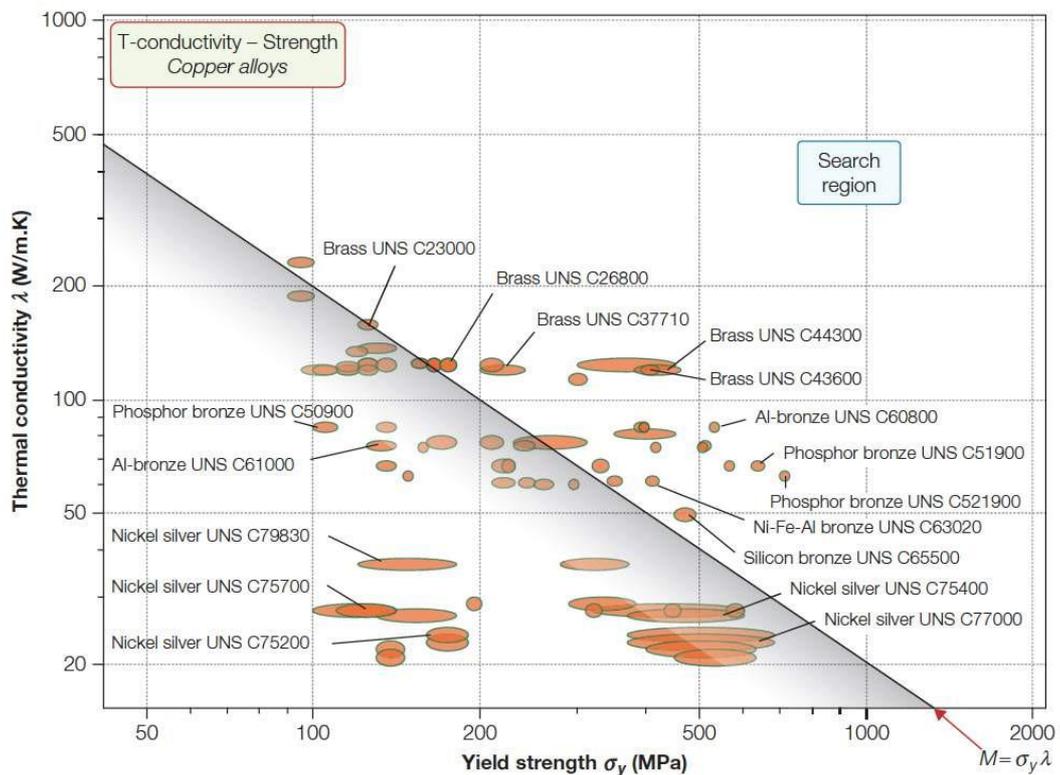
Empat pertimbangan lebih lanjut memasuki seleksi. Sangat penting untuk memilih bahan yang dapat menahan korosi dalam fluida kerja, yang digunakan dalam pemilihan ini adalah air yang mengandung ion klorida (air laut). Suhu layanan maksimumnya harus cukup di atas suhu fluida kerja yang lebih panas dan material harus memiliki keuletan yang cukup untuk ditarik ke dalam tabung atau dirol ke dalam lembaran.

Material	Indeks M W.MN/m ³ .K	Comment
Brasses, naval brass	5.0 x 10 ⁴	Liable to dezincification
Phosphor bronzes	4.0 x 10 ⁴	Cheap, but not as corrosion resistance as aluminum bronze
Aluminum-bronze, wrought	3.8 x 10 ⁴	An economical and practical choice
Nickel-iron-aluminum-bronzes	2.5 x 10 ⁴	More corrosion resistant, but more expensive
Silicon bronze	2.2 x 10 ⁴	Less good than aluminum bronze

Selection. Pencarian awal untuk material dengan nilai besar M_1 , menggunakan grafik λ - σ_f pada Gambar 5.10, menunjukkan paduan tembaga tempa sebagai satu kemungkinan. Batas suhu maksimum layanan adalah 150⁰C, 30% elongasi, biaya material kurang dari \$6/kg, peringkat ketahanan "sangat baik" terhadap air laut dan pembatasan pencarian untuk paduan tembaga. Dari Gambar 5.11 diperoleh grafik baru σ_y - λ memungkinkan $M_1 = \sigma_y\lambda$ untuk dimaksimalkan. Material dengan M_1 besar tercantum dalam Tabel 5.9.



Gambar 5.10 Grafik kekuatan luluh – konduktifitas thermal yang menunjukkan indeks M_1



Gambar 5.11 Grafik λ - σ_y pada paduan tembaga yang menunjukkan indeks M_1

Postscript. Konduksi dapat membatasi aliran panas. Air laut sering kali menjadi salah satu fluida kerja. Organisme biofouling yang menempel pada dinding tabung dan berkembang di

sana, seperti teritip di atas kapal menciptakan lapisan ketahanan termal tinggi yang menghambat aliran cairan. Pencarian dokumentasi mengungkapkan bahwa beberapa material lebih tahan terhadap biofouling daripada yang lain: paduan tembaga-nikel sangat baik, mungkin karena organisme tidak menyukai garam tembaga, bahkan dalam konsentrasi yang sangat rendah. Jika tidak, masalah harus diatasi dengan menambahkan inhibitor kimia ke cairan atau dengan mengikis.

Hal ini kadang-kadang penting untuk meminimalkan berat penukar panas. Perhitungan ulang untuk mencari material, nilai maksimum Q/m (di mana m adalah massa tabung) memberikan indeks M_2 :

$$M_2 = \frac{\lambda \sigma_y^2}{\rho}$$

di mana ρ adalah kepadatan material tabung. Kekuatan σ_y dinaikkan ke kekuatan 2 karena berat tergantung pada ketebalan dinding, densitas, dan ketebalan dinding bervariasi sebagai $1/\sigma_y$.

Penukar panas termurah adalah yang terbuat dari bahan dengan nilai terbesar:

$$M_3 = \frac{\lambda \sigma_y^2}{C_m \rho}$$

dimana C_m adalah biaya material per kg. Paduan aluminium memiliki skor tinggi karena ringan dan murah. Pilihan tidak ditampilkan tetapi dapat dengan mudah dieksplorasi menggunakan sistem CES.

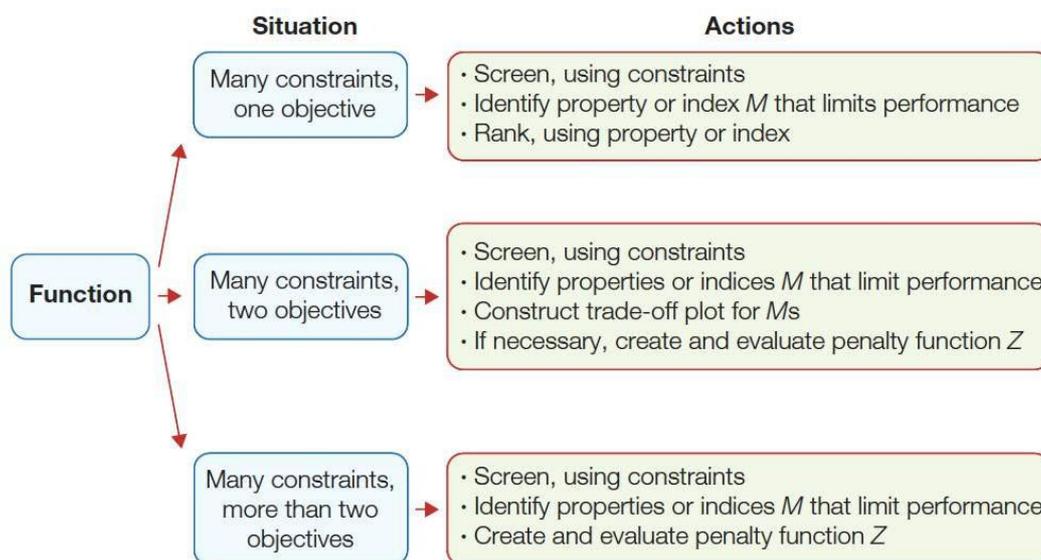
MULTIPLE CONSTRAINTS AND CONFLICTING OBJECTIVES

Dalam pemilihan material dan proses harus mampu mengkompromikan semua kendala yang saling bertentangan. Dalam desain sayap pesawat terbang dituntut bobotnya harus ringan tetapi kendala yang harus dipenuhi adalah kekakuan, kekuatan lelah, ketangguhan dan geometrik. Yang menjadi persoalan adalah bagaimana kendala yang saling bertentangan ini dapat dikompromikan. Ada banyak cara untuk mengkompromikan berbagai kendala dan tujuan yang saling bertentangan ini. Langkah-langkah yang dapat ditempuh ditunjukkan oleh gambar 6.1

6.1 Pemilihan Dengan Berbagai Kendala

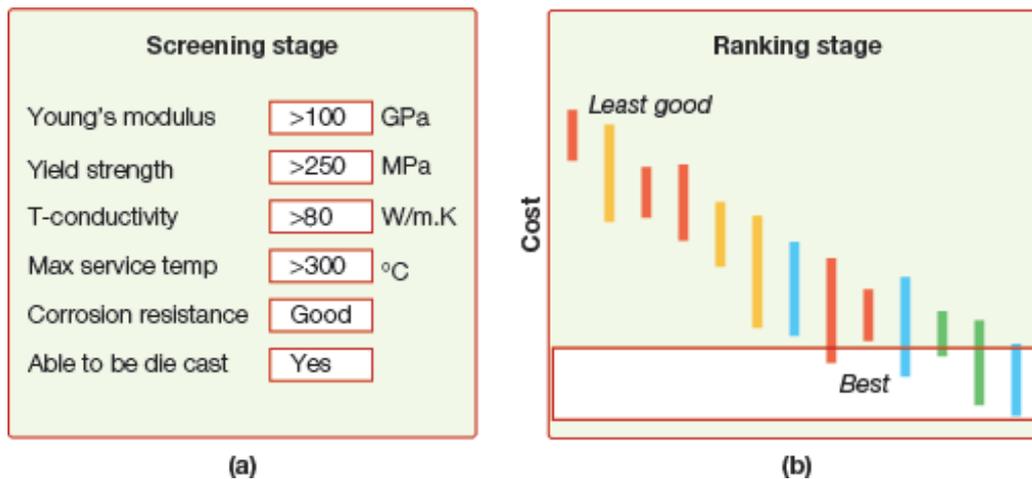
Permasalahan pemilihan material selalu memiliki banyak kendala, artinya kendala lebih banyak daripada variabel bebasnya. Dengan mengidentifikasi kendala dan tujuan yang dipaksakan dengan persyaratan desain, maka dapat dilakukan langkah-langkah berikut:

1. Skrining, menggunakan masing-masing kendala.
2. Pemingkatan, penggunaan metrik kinerja yang menerangkan tujuan (massa, volume, biaya) atau indeks material yang muncul dalam persamaan.
3. Mencari dokumenasi material yang diranking teratas dan menggunakannya untuk membuat pilihan terakhir.



Gambar 6.1 Strategi pemilihan dengan banyak kendala dan tujuan yang bertentangan

Perhatikan Gambar 6.2! Kotak sebelah kiri menggambarkan skrining dengan memaksakan kendala pada sifat material, seperti ketahanan korosi atau kemampuan diproses dengan cara tertentu. Dan yang sebelah kanan, diagram batang untuk biaya material kandidat.

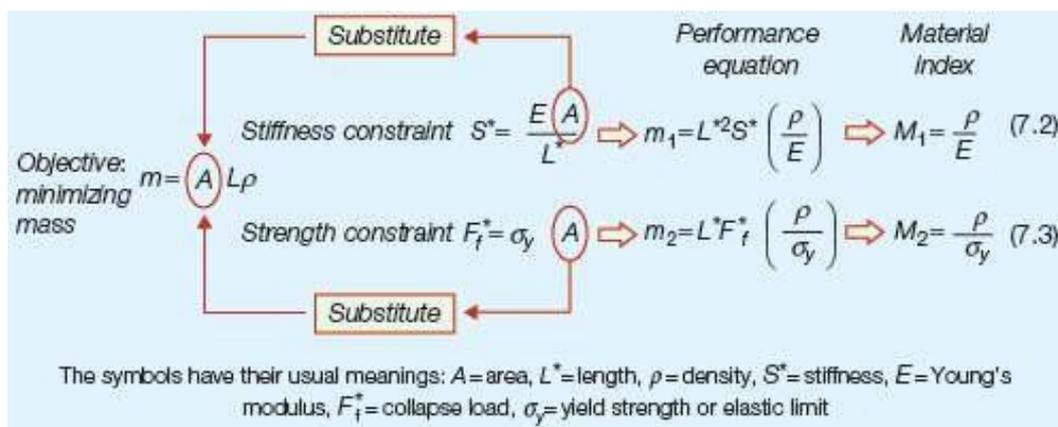


Gambar 6.2 Pemilihan kendala yang beragam (a) satu tujuan (b) skrining dengan menggunakan kendala, pemeringkatan menggunakan tujuan.

Sebagai contoh adalah batang kemudi yang memerlukan bobot ringan tetapi kekakuan dan kekuatan harus terpenuhi. Jika kekakuan adalah kendala utama, massa dari batang adalah m_1 . Jika kekuatan, massa adalah m_2 . Jika batang yang mempertemukan persyaratan pada keduanya, massanya harus lebih besar daripada m_1 dan m_2 . Kondisi ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\bar{m} = \max(m_1, m_2) \dots \dots \text{Pers. 6.1}$$

maka harus dicari material yang memiliki nilai m terkecil. Berikut adalah persoalan “min-max”.



Gambar 6.3 Satu tujuan dengan dua kendala mengarah ke dua persamaan kinerja, masing-masing nilai M .

Metode Analitis. Metode yang sangat berguna untuk menyelesaikan permasalahan min-max ketika metric (massa) adalah fungsi kontinu dari variabel kendali. Variabel kendali di sini adalah material dan kita harus mempertemukan dengan populasi material, dimana masing-masing memiliki sifat material yang unik. Kondisi seperti ini adalah masalah diskrit, bukan kontinu.

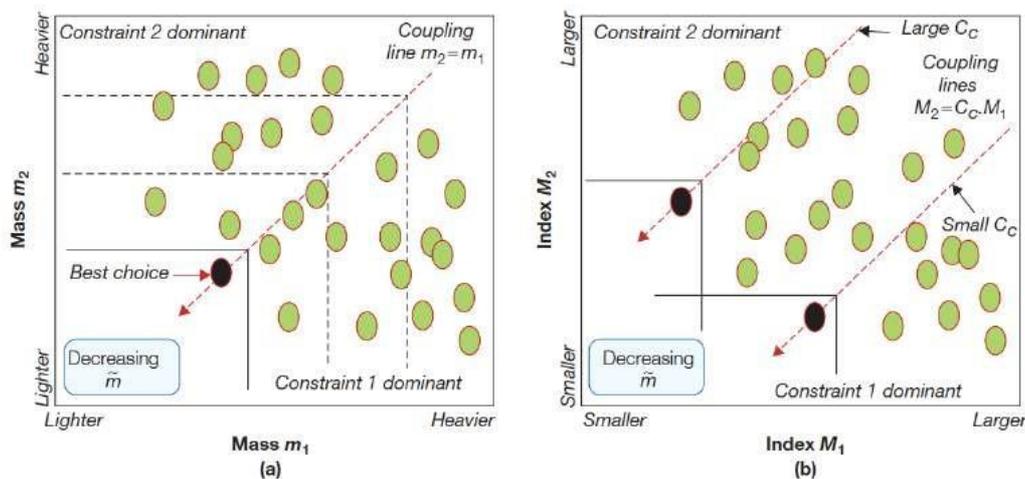
Contoh. Sebuah material diperlukan untuk light tie dengan panjang L (1 meter), kekakuan S (3×10^7 N/m) dan beban kritis F_f (10^5 N). Tentukan material yang paling baik:

Jawab. Dengan substitusi pada persamaan pada Gambar 6.3 maka diperoleh nilai m_1 dan m_2 . Untuk persyaratan desain ini maka Ti-6-4 adalah pilihan terbaik. Hal ini memungkinkan light tie yang paling ringan yang memenuhi kedua kendala adalah:

Material	ρ kg/m ³	E GPa	σ_y MPa	m_1 kg	m_2 kg	\bar{m} kg
Baja 1020	7,850	200	320	1.12	2.45	2.45
Al 6061	2,700	70	120	1.16	2.25	2.25
Ti-6-4	4,400	115	950	1.15	0.46	1.15

Jika kendala sekarang berubah menjadi L (3 meter), S^* (10^8 N/m) dan F_f (3×10^4 N). Maka baja adalah pilihan terbaik yang paling memenuhi semua kendala.

Metode grafis. Untuk populasi material, yang diplot m_1 vs m_2 seperti pada Gambar 7.4(a). Setiap gelembung mewakili material. Semua variabel dalam kedua persamaan untuk m_1 dan m_2 sudah ditentukan kecuali materialnya. Jadi satu-satunya perbedaan antara satu gelembung dan yang lainnya adalah materialnya. Jika ingin meminimalkan massa, pilihan terbaik terletak di dekat kiri bawah. Tapi dimana, tepatnya? Jika kekakuan adalah yang terpenting, kekuatan tidak penting pasti harus berbeda. Baris $m_1 = m_2$ memisahkan bagan menjadi dua bagian. Jika $m_1 > m_2$ dan kendala 1 (kekakuan) dominan. Jika $m_2 > m_1$ dan kendala 2 (kekuatan) mendominasi. Di wilayah 1, tujuan adalah untuk meminimalkan m_1 karena itu adalah yang lebih besar dari keduanya. Semakin dekat kotak ditarik ke kiri bawah, nilai \bar{m} semakin kecil. Pilihan terbaik adalah material terakhir yang tersisa di dalam kotak.



Gambar 6.4 Pendekatan grafis penyelesaian min-max (a) pemilihan material menggunakan metric kinerja, (b) pendekatan lebih umum, dengan menggunakan indeks material M dan konstanta C_c .

Gambar 6.4(a), dengan m_1 dan m_2 sebagai sumbu, khusus untuk nilai tunggal L^* , S^* , dan F_f^* . Jika indeks material $M_1 = \rho/E$ dan $M_2 = \rho/\sigma_y$ yang terkandung dalam persamaan kinerja, seperti

yang ditunjukkan pada Gambar 6.4(b). Setiap gelembung masih mewakili material, tetapi sekarang posisinya hanya tergantung pada sifat material, bukan pada nilai L^* , S^* , dan F_f^* . Kondisi $m_1=m_2$, substitusi dari Persamaan (7,2) dan (7,3) pada Gambar 6.3 menghasilkan hubungan:

$$M_2 = \left(\frac{L^*S^*}{F_f^*} \right) M_1 \dots \dots \text{Pers. 7.4}$$

atau dalam skala logaritmik:

$$\log(M_2) = \log(M_1) + \log \left(\frac{L^*S^*}{F_f^*} \right) \dots \dots \text{Pers. 7.5}$$

Ini menjelaskan garis kemiringan 1, dalam posisi yang tergantung pada nilai $LS = F_f$. Kami menyebut baris ini sebagai garis konektor dan L^*S^*/F_f^* sebagai konstanta konektor, simbol C_c . Strategi pemilihan tetap sama. Sebuah kotak, dengan sudutnya di garis konektor, ditarik ke bawah ke arah kiri bawah. Tetapi bagan sekarang lebih umum, mencakup semua L^* , S^* , dan F_f^* . Mengubah salah satu dari ini, atau geometri komponen dengan memindahkan garis konektor dan mengubah pilihan.

6.2 Tujuan Yang Bertentangan

Pemilihan material hampir selalu mengharuskan untuk tercapainya kompromi antara tujuan yang bertentangan. Tiga hal yang harus diperhatikan adalah:

1. Meminimalkan massa, target umum dalam merancang sesuatu yang bergerak atau harus dipindahkan, yang beresilasi, atau yang harus merespons dengan cepat ke gaya terbatas (pikirkan sistem transportasi dirgantara dan darat).
2. Meminimalkan volume, karena material yang digunakan lebih sedikit dan karena ruang semakin berharga (pikirkan drive untuk ponsel yang semakin tipis, lebih kecil, komputer portabel, pemutar MP3, dan kebutuhan untuk mengemas lebih banyak dan lebih banyak fungsi ke dalam volume tetap).
3. Meminimalkan biaya, profitabilitas tergantung pada perbedaan antara biaya dan nilai. Cara paling efektif untuk meningkatkan perbedaan ini adalah dengan mengurangi biaya.

Untuk ini kita sekarang harus menambahkan tujuan keempat:

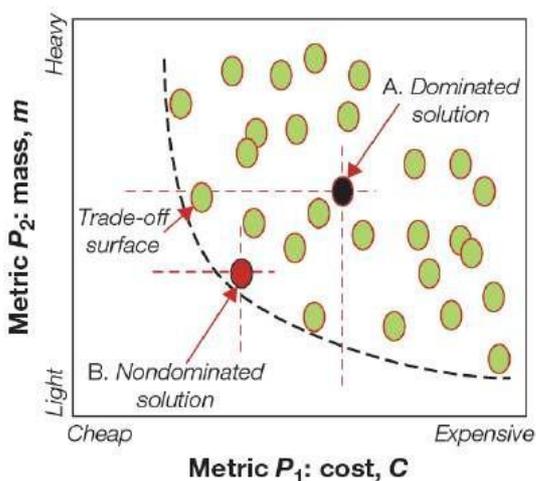
4. Meminimalkan dampak lingkungan, kerusakan pada lingkungan yang disebabkan oleh produksi material, pembuatan produk dan penggunaan produk.

Tujuan memaksimalkan rasio daya terhadap berat diterjemahkan menjadi meminimalkan massa untuk output daya yang diberikan. Memaksimalkan penyimpanan energi di musim semi, baterai, atau flywheel berarti meminimalkan volume untuk energi tersimpan. Konflik akan muncul ketika pilihan mengoptimalkan satu tujuan, dan tidak untuk yang lain. Pilihan terbaik adalah kompromi, mengoptimalkan tidak ada tetapi mendorong semua sedekat mungkin dengan optimum karena interdependensi tetap dipertahankan. Bagaimana massa dibandingkan dengan biaya, atau volume dengan dampak lingkungan?

Strategi trade-off. Pertimbangan pemilihan material adalah meminimalkan biaya (metrik kinerja P_1) dan massa (metrik kinerja P_2) suatu saat bertemu seperangkat batasan seperti suhu layanan maksimum yang diperlukan atau ketahanan korosi terhadap lingkungan tertentu. Dengan merujuk terminologi standar teori pengoptimalan sebagai solusi pemilihan material yang cukup, dapat memenuhi semua kendala tetapi belum tentu optimal dengan salah satu tujuan. Gambar 6.5 adalah plot P_1 vs P_2 untuk solusi alternatif. Setiap gelembung menggambarkan salah satunya. Solusi yang meminimalisir P_1 tidak meminimalisir P_2 , begitu juga sebaliknya. Beberapa solusi, seperti di A, masih jauh dari optimal—semua solusi dalam kotak yang terpasang pada A memiliki nilai yang lebih rendah dari P_1 dan P_2 . Solusi seperti A dikatakan didominasi oleh yang lain. Solusi seperti yang ada di B memiliki karakteristik bahwa tidak ada solusi lain dengan nilai yang lebih rendah dari P_1 dan P_2 . Ini dikatakan sebagai solusi yang disimpinasi. Garis atau permukaan di mana mereka berada disebut *trade-off surface* yang berlaminasi atau optimal. Nilai P_1 dan P_2 yang bersesuaian dengan serangkaian solusi yang tidak didominasi disebut set Pareto.

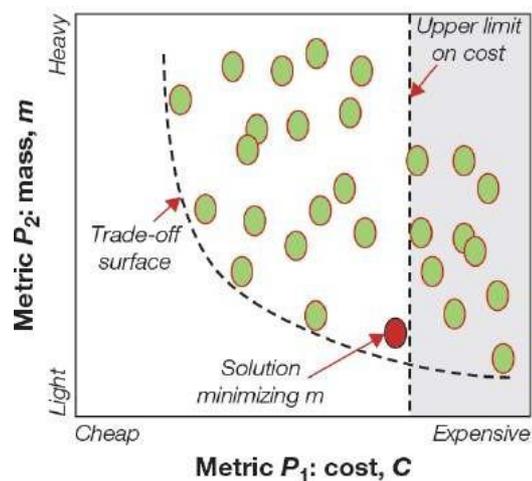
Ada tiga strategi, yaitu:

1. Strategi 1: solusi pada atau dekat permukaan trade-off menawarkan kompromi terbaik; sisanya dapat ditolak. Strategi ini cukup untuk mengidentifikasi daftar pendek, menggunakan intuisi untuk memberi peringkat.
2. Strategi 2: satu tujuan dapat direformulasi sebagai kendala, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6.6. Di sini batas atas ditetapkan pada biaya: solusi yang meminimalkan kendala lain kemudian dapat dibaca. Strategi ini curang, karena bukan optimasi sejati.
3. Strategi 3: fungsi penalti.



Gambar 6.5

Tujuan ganda: Menentukan material yang meminimalisir massa dan biaya. Setiap bubble adalah solusi – pemilihan material yang menemukan kendala. Permukaan trade-off menghubungkan solusi yang tidak dominan.



Gambar 6.6

Plot trade-off dengan kendala sederhana yang diberlakukan untuk biaya. Solusi dengan massa terendah tetapi bukan optimisasi sejati.

Fungsi Pinalti. Permukaan trade-off mengidentifikasi subset solusi yang menawarkan kompromi terbaik antara tujuan. Salah satu cara untuk melakukan kompromi adalah dengan menggabungkan berbagai tujuan ke dalam satu fungsi objektif, diformulasikan sedemikian rupa sehingga minimumnya mendefinisikan solusi yang paling baik. Fungsi pinalti linear setempat adalah:

$$Z = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 \dots \dots \dots \text{Pers. 6.6}$$

Pilihan terbaik adalah material dengan nilai Z terkecil. Konstanta pertukaran (kesetimbangan, konstanta utilitas atau konstanta penskalaan) yang mengkonversi satuan kinerja menjadi satuan Z, yang biasanya mata uang (\$). Konstanta pertukaran didefinisikan oleh:

$$\alpha_1 = \left(\frac{\partial Z}{\partial P_1} \right)_{P_{j,j} \neq 1} \dots \dots \text{Pers. 6.7}$$

Pengukuran kenaikan penalti untuk kenaikan satuan dalam metrik kinerja yang ditentukan, dan yang lain ditahan konstan. Jika metrik P_2 adalah massa m , maka α_2 adalah perubahan Z yang terkait dengan peningkatan satuan m . Sering kali salah satu tujuan untuk diminimalkan adalah biaya, C , sehingga $P_1=C$. Maka masuk akal untuk mengukur Z dalam satuan mata uang. Dengan pilihan ini, perubahan satuan dalam C memberikan perubahan satuan dalam Z , dengan hasil $\alpha_1=1$ dan Persamaan 6.6 menjadi:

$$Z = C + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 \dots \dots \dots \text{Pers. 6.8}$$

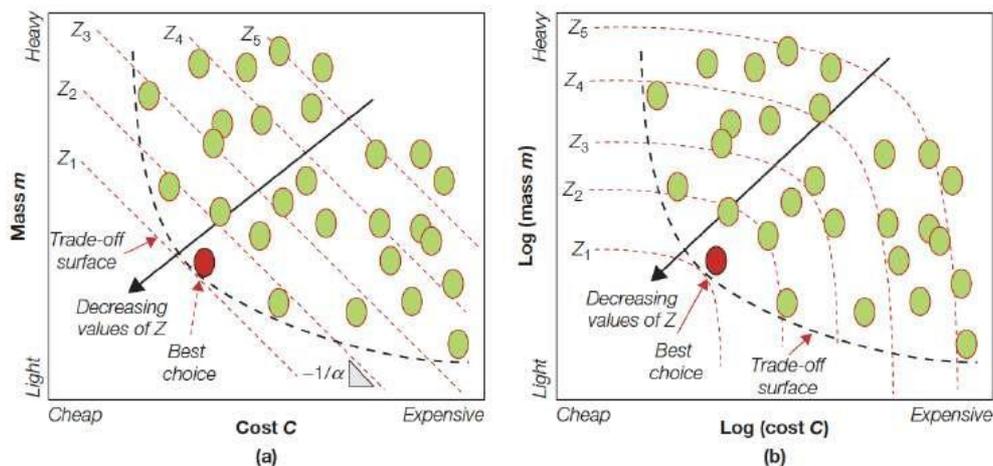
Pertimbangkan sekarang contoh sebelumnya di mana $P_1 =$ biaya C dan $P_2 =$ massa m , sehingga:

$$Z = C + \alpha m \dots \dots \text{Pers. 6.9}$$

Atau:

$$m = -\frac{1}{\alpha} C + \frac{1}{\alpha} Z \dots \dots \text{Pers. 6.10}$$

dimana α adalah perubahan Z yang terkait dengan peningkatan unit dalam m . Persamaan 6.10 mendefinisikan hubungan linear antara m dan C . Plot ini sebagai kelompok garis penalti yang paralel, masing-masing untuk nilai yang diberikan Z , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.7(a).



Gambar 7.7 (a) Fungsi penalti yang ditumpangkan Z pada plot trade-off. Kontur Z memiliki kemiringan $-1/\alpha$. Kontur yang bersinggungan dengan permukaan trade-off mengidentifikasi solusi optimal (b) Yang sama, diplot pada skala logaritmik; relasi linear sekarang muncul sebagai garis melengkung.

Kemiringan garis adalah timbal balik dari konstanta pertukaran, $-1/\alpha$. Nilai Z menurun ke arah kiri bawah dan merupakan pilihan terbaik. Solusi optimal adalah salah satu titik paling dekat di mana garis penalti bersinggungan dengan permukaan trade-off karena memiliki nilai Z terkecil.

Menggunakan Fungsi Penalti

Konstanta pertukaran untuk penghematan berat pada truk ringan adalah $\alpha = \$12/\text{kg}$, yang berarti bahwa nilai pengurangan bobot selama masa pakai kendaraan adalah $\$12/\text{kilogram}$ yang disimpan. Perancang kendaraan menawarkan tiga model. Yang pertama menggunakan panel baja untuk pekerjaan bodi. Yang kedua menggunakan aluminium, biaya lebih besar dari $\$2.500$ tetapi beratnya lebih ringan 300 kg . Yang ketiga panel serat karbon dengan biaya lebih besar dari $\$7.000$ dan beratnya lebih ringan dari 500 kg . Mana yang layak untuk dibeli?

Jawaban:

Fungsi penalti untuk kendaraan baja (1) dan aluminium (2) adalah:

$$Z_1 = C_1 + \alpha m_1$$

dan

$$Z_2 = C_2 + \alpha m_2$$

Kendaraan dari aluminium menarik hanya jika Z-nya lebih rendah dari Z baja. Menulis:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = C_2 - C_1 + \alpha(m_2 - m_1) = 2500 - (12 \times 300) = -1100$$

Kendaraan berpanel aluminium menawarkan penghematan masa pakai sebesar $\$1.100$. dengan menggunakan cara yang sama maka kendaraan berpanel komposit memberikan nilai:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = C_2 - C_1 + \alpha(m_2 - m_1) = 8000 - (12 \times 500) = +2000$$

dengan demikian, panel serat karbon bukan pilihan terbaik. Kandidat terbaik adalah titik terdekat di mana salah satu kurva ini hanya menyentuh permukaan trade-off.

Fungsi Penalti Relatif. Fungsi penalti relatif dapat digunakan untuk mencari material yang lebih baik, lebih membantu untuk membandingkan pilihan material baru dengan yang ada. Secara matematis dinyatakan:

$$Z^* = \frac{C}{C_o} + \alpha^* \frac{m}{m_o} \dots \dots \text{Pers. 7.11}$$

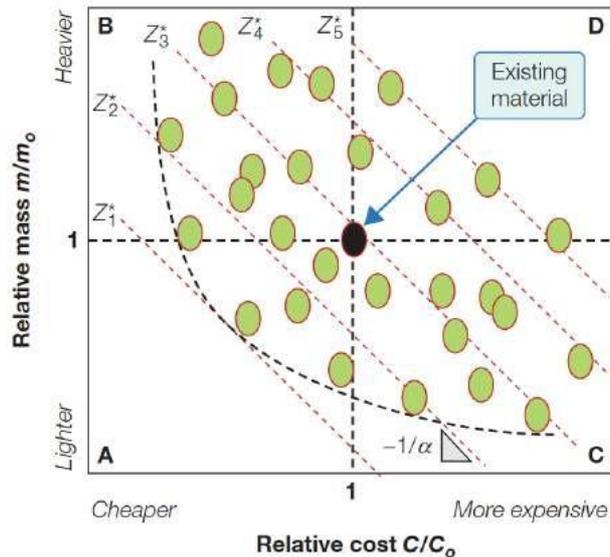
Di mana subskrip o berarti sifat material yang ada dan tanda bintang * pada Z^* dan α^* adalah pengingat tanpa dimensi. Konstanta pertukaran relatif α^* mengukur perolehan nilai fraksional untuk perolehan pecahan kinerja tertentu. Dengan demikian $\alpha^* = 1$ berarti bahwa pada Z konstan:

$$\frac{\Delta C}{C_o} = - \frac{\Delta m}{m_o}$$

dan bahwa yang memiliki massa dianggap bernilai dua kali biaya.

Gambar 6.8 menunjukkan plot trade-off relatif, pada skala linear. Sumbunya adalah C/C_o dan m/m_o . Material yang saat ini digunakan dalam aplikasi muncul di koordinat (1,1). Solusi di sektor A lebih ringan dan lebih murah daripada material yang ada, yang ada di sektor B lebih murah tetapi lebih berat, yang di sektor C lebih ringan tetapi lebih mahal, dan mereka yang

berada di sektor D tidak menarik. Kontur Z^* dapat diplot ke dalam sosok. Kontur yang bersinggungan ke permukaan trade-off relatif mengidentifikasi area pencarian yang optimal. Seperti sebelumnya, ketika timbangan logaritmik digunakan, kontur Z^* menjadi kurva. Jadi jika nilai untuk konstanta pertukaran diketahui, seleksi yang sepenuhnya sistematis dimungkinkan.



Gambar 6.8 Plot trade-off relatif, berguna ketika mencari pengganti material yang ada dengan tujuan mengurangi massa atau biaya atau keduanya. Material yang ada terletak di koordinat (1,1) adalah di sektor A: lebih ringan dan murah.

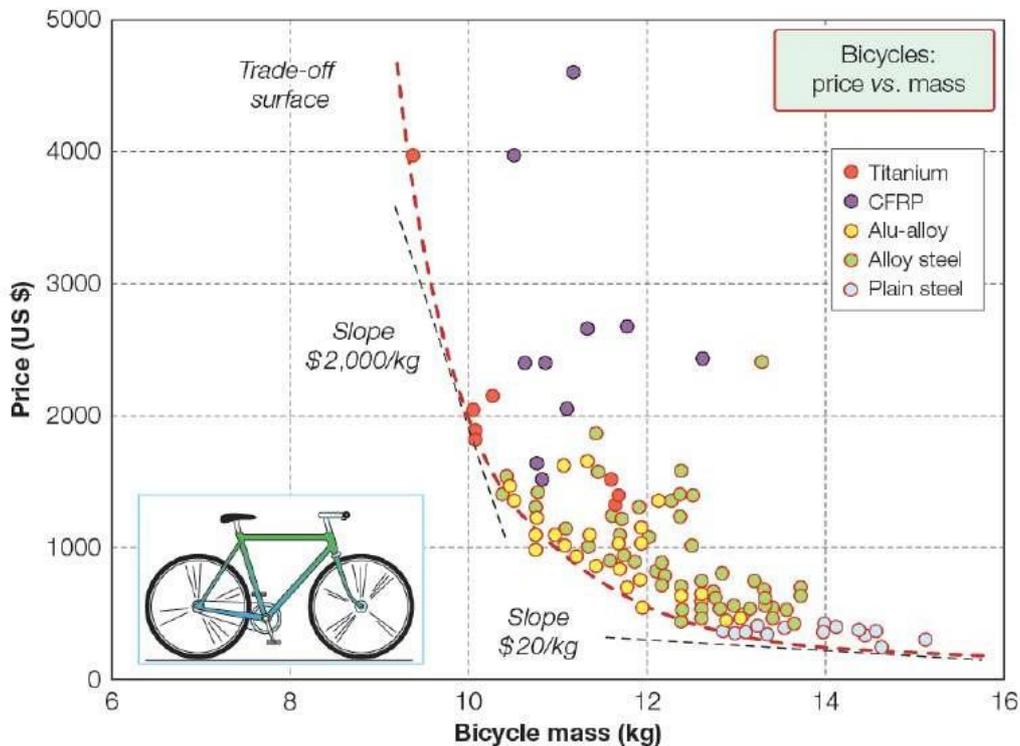
Nilai untuk konstanta pertukaran α . Konstanta pertukaran adalah ukuran penalti peningkatan satuan dalam metrik kinerja. Atau konstanta pertukaran adalah nilai atau "utilitas" dari penurunan satuan dalam metrik. Penghematan berat bodi mobil adalah kecil, sedangkan di kedirgantaraan jauh lebih besar. Utilitas perpindahan panas dalam isolasi rumah berkaitan langsung dengan biaya energi yang digunakan untuk memanaskan rumah, sedangkan dalam pertukaran panas untuk elektronik daya bisa jauh lebih tinggi karena meningkatkan kinerja listrik. Utilitas ini bisa nyata, yang berarti bahwa itu mengukur penghematan biaya yang sebenarnya. Utilitas penghematan berat dalam sistem transportasi berasal dari nilai bahan bakar yang disimpan atau peningkatan muatan yang dievaluasi selama masa pakai sistem.

Tabel 6.1 Konstanta pertukaran untuk trade-off massa-biaya pada system transportasi

Sektor Sistem Transportasi	Basis Estimasi	Konstanta Pertukaran, α (US\$/kg)
Mobil keluarga	Fuel saving	1-2
Truk	Payload	5-20
Pesawat sipil	Payload	100-500
Pesawat militer	Payload, performance	500-1000
Kendaraan ruang angkasa	Payload	3000-10000

Tabel 6.1 memberikan nilai perkiraan untuk α . Hal yang paling mencolok adalah nilai α dengan jangkauan yang sangat besar. Konstanta pertukaran tergantung pada material yang digunakan akan diterapkan dimana. Inilah kesulitan untuk mengadopsi paduan aluminium pada mobil, meskipun umum digunakan pada pesawat terbang. Penggunaan paduan titanium yang jauh lebih besar dalam militer daripada di pesawat sipil, dan pembatasan berilium kendaraan ruang angkasa.

Konstanta pertukaran dapat diperkirakan dengan berbagai cara. Biaya peluncuran muatan ke luar angkasa pada kisaran \$3.000-\$10.000/kg. Pengurangan 1 kg berat struktur, peluncuran akan memungkinkan peningkatan beban. Demikian pula berdasarkan peningkatan muatan atau penurunan konsumsi bahan bakar memberikan nilai yang ditunjukkan untuk pesawat sipil, truk komersial, dan mobil. Nilai-nilai berubah seiring waktu, mencerminkan perubahan biaya bahan bakar, undang-undang untuk meningkatkan penghematan bahan bakar dan jenisnya. Keadaan khusus dapat mengubahnya secara dramatis, seperti pembuatan mesin jet yang telah menjamin rasio daya/berat tertentu untuk mesin mungkin bersedia membayar lebih dari \$ 1.000 untuk menghemat satu kilogram jika itu adalah satu-satunya cara jaminan dapat dipenuhi, atau (dinyatakan sebagai penalti) ia akan dikenakan sanksi \$1.000/kg jika tidak dapat terpenuhi.



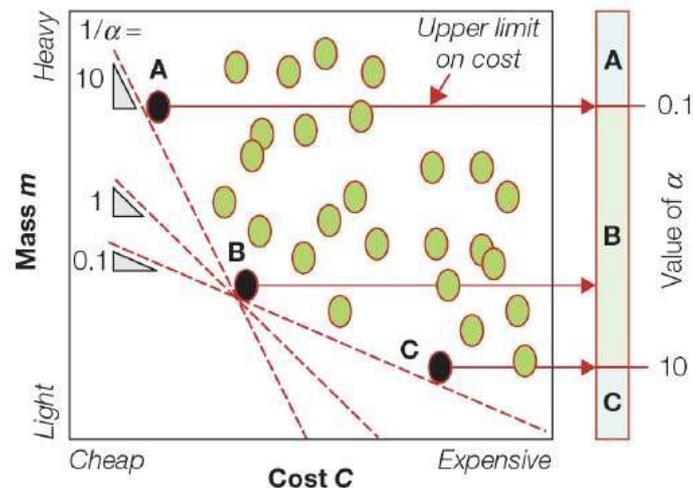
Gambar 6.9 Plot trade-off biaya-massa untuk sepeda dari data majalah sepeda. Persinggungan ke permukaan trade-off pada titik mana pun memberikan perkiraan konstanta pertukaran. Bagi konsumen yang mencari sepeda murah untuk berbelanja, nilai penghematan berat adalah rendah \$20/kg. Bagi seorang penggemar yang menginginkan kinerja bisa tinggi \$2.000/kg).

Nilai-nilai ini untuk konstanta pertukaran didasarkan pada kriteria teknik. Analisis nilai trade-off berat/ biaya untuk sepeda dapat dilihat pada Gambar 6.9. Pengendara sepeda menghendaki pengurangan beratnya. Data plot trade off massa dan biaya sepeda diperoleh dari

majalah sepeda. Persinggungan garis trade-off pada titik mana pun memberikan ukuran konstanta pertukaran, berkisar dari \$20/kg hingga \$2.000/kg tergantung pada massa. Ada kalanya menetapkan konstanta pertukaran menjadi sulit. Salah satu contohnya adalah dampak lingkungan yang disebabkan oleh proses produksi, pemakaian, dan sisa produk. Meminimalkan dampak lingkungan menjadi tujuan penting, seperti halnya meminimalkan biaya.

Bagaimana konstanta pertukaran memengaruhi pilihan? Perbedaan ruang pencarian untuk pemilihan material berarti bahwa solusi yang diberikan pada permukaan trade-off adalah optimal untuk rentang nilai α tertentu. Di luar rentang tersebut, solusi lain menjadi pilihan optimal. Rentangnya bisa besar, sehingga nilai konstanta pertukaran dalam rentang mengarah pada pilihan bahan yang sama.

Gambar 6.10 menunjukkan tiga yang berpotensi optimal. Untuk $\alpha \leq 0.1$ (sehingga $1/\alpha \geq 10$) maka solusi A adalah optimal, untuk $0.1 < \alpha < 10$ maka solusi B adalah pilihan terbaik, dan untuk $\alpha \geq 10$ maka solusi C. Informasi ini dapat ditangkap di batang sebelah kanan gambar yang menunjukkan rentang nilai α , dibagi pada titik-titik di mana perubahan optimal terjadi dan dilabeli dengan solusi yang optimal di setiap rentang.



Gambar 6.10 Seringkali terjadi bahwa satu bahan optimal di atas berbagai nilai konstanta pertukaran. Kemudian perkiraan nilai untuk konstanta pertukaran cukup untuk mencapai kesimpulan yang tepat tentang pilihan bahan.

6.3 Kesimpulan

1. Metode indeks material merupakan prosedur yang sederhana dan transparan dalam pemilihan bahan dengan meminimalkan satu tujuan sambil menemukan serangkaian kendala sederhana. Tetapi hal sederhana seperti jarang, karena ukuran kinerja yang berbeda saling bersaing dan harus dilakukan kompromi.
2. Penilaian dapat digunakan untuk memberi peringkat pentingnya kendala dan tujuan yang bersaing. Faktor berat atau logika fuzzy menempatkan penilaian pada pijakan yang lebih formal, tetapi juga dapat mengaburkan konsekuensinya.
3. Jika memungkinkan, penilaian harus diganti dengan analisis. Untuk beberapa kendala dilakukan dengan mengidentifikasi batasan aktif dan mendasarkan desain pada batasan ini. Prosedur ini dapat dibuat grafis dengan menurunkan persamaan konektor

yang menghubungkan indeks material. Konstruksi sederhana pada grafik pemilihan material dengan indeks sebagai sumbu secara tidak ambigu mengidentifikasi subset bahan yang memaksimalkan kinerja sambil memenuhi semua kendala. Tujuan majemuk memerlukan perumusan fungsi penalti, Z , yang berisi satu atau lebih konstanta pertukaran α_1 . Meminimalkan Z untuk mengidentifikasi pilihan optimal.

4. Ketika beberapa kendala beroperasi, atau tujuan majemuk terlibat, pilihan bahan terbaik jauh dari jelas.

CASE STUDIES: MULTIPLE CONSTRAINTS AND CONFLICTING OBJECTIVES

7.1 Light Pressure Vessel

Sebuah pressure vessel digunakan untuk tekanan p tertentu tanpa mengalami kegagalan karena adanya peluluhan (*yield*) dan pecah (*fast fracture*). Jika bobot pressure vessel itu ringan dengan R tertentu, maka diperlukan pemilihan material yang tepat. Untuk menyelesaikan persoalan ini dapat dirumuskan persyaratan desain.

Design Requirement for Safe Pressure Vessel

Function	Light pressure (contain pressure p safely)
Constraints	Radius R specified Must not fail by yield Must not fail by fast fracture
Objective	Minimize mass
Free Variables	Wall thickness t Choice of material

Dari persyaratan desain maka dapat diketahui bahwa ini masalah "min-max". Berikut ini adalah langkah-langkah penyelesaiannya.

Translasi

Massa pressure vessel bulat berdinding tipis adalah:

$$m = 4\pi R^2 t \rho$$

The stress in the wall of the vessel:

$$\sigma = \frac{pR}{2t}$$

The vessel must not yield requires that $\sigma < \sigma_y$, where σ_y is the yield strength of the wall material.

$$t = \frac{pR}{2\sigma_y}$$

Mass of vessel:

$$m_1 \geq 2\pi R^3 p \left(\frac{\rho}{\sigma_y} \right)$$

Material index:

$$M_1 = \frac{\rho}{\sigma_y}$$

The condition of no fast fracture requires that $\sigma < \sigma_f$:

$$\sigma_f = \frac{K_{Ic}}{C\sqrt{\pi a_c^*}}$$

The wall thickness is:

$$t \geq \frac{pR\sqrt{\pi a_c^*}}{2K_{Ic}}$$

Mass of vessel:

$$m_2 \geq 2\pi R^3 p \sqrt{\pi a_c^*} \left(\frac{\rho}{K_{Ic}} \right)$$

Material Index:

$$M_2 = \left(\frac{\rho}{K_{Ic}} \right)$$

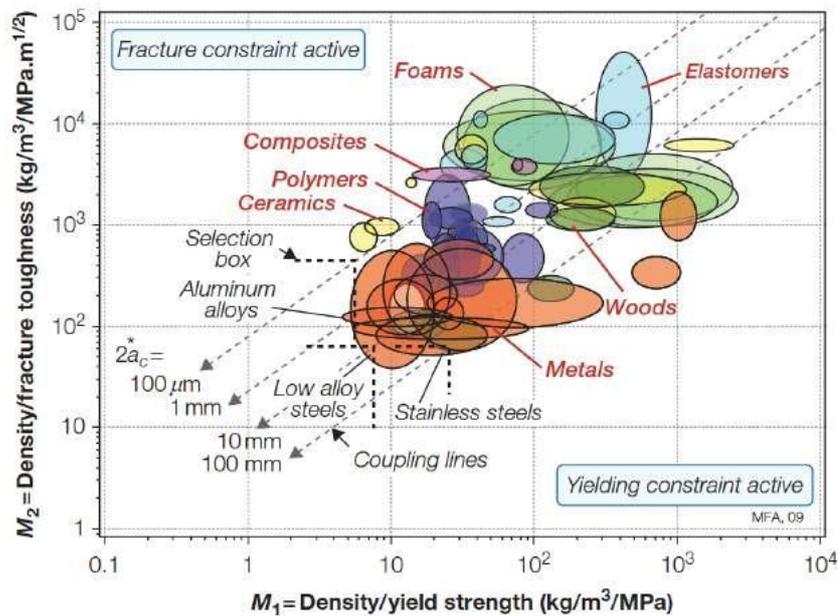
The equation of the coupling line linking M_1 and M_2 :

$$M_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi a_c^*}} M_1$$

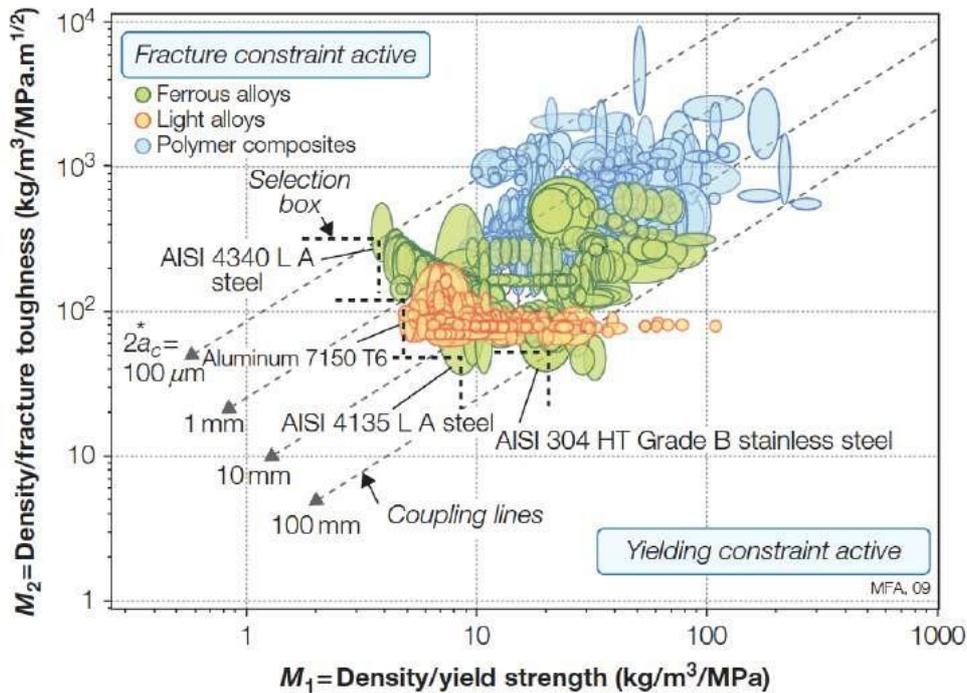
Pemilihan Material

Indeks M_1 dan M_2 adalah sumbu seperti pada Gambar 7.1 dan 7.2. Keduanya menunjukkan posisi garis konektor untuk nilai yang berbeda dari panjang retakan a_c^* . Pilih salah satu yang menunjukkan retakan terpanjang pada material. Pemilihan dilakukan dengan menempatkan kotak dengan sudutnya pada garis konektor yang sesuai dan menggesernya ke bawah garis, mengurangi M_1 dan M_2 sampai hanya menyisakan sejumlah kecil material kandidat.

Dari Gambar 7.1 menunjukkan bahwa paduan aluminium dan baja adalah pilihan terbaik. Untuk melihat lebih lebih maka digunakan Gambar 7.2 dengan plotting yang sama, tetapi bahannya terbatas pada baja paduan rendah berkekuatan tinggi, baja tahan karat, paduan aluminium, dan komposit polimer-matriks. Dari gambar ini diperoleh paduan spesifik untuk *pressure vessel* yang paling ringan dengan panjang retakan a_c^* .



Gambar 7.1 Desain yang terlalu dibatasi menyebabkan dua atau lebih indeks kinerja yang diikat dengan persamaan konektor. Garis diagonal putus-putus menunjukkan persamaan konektor untuk empat nilai panjang retak $2a_c^*$. Garis pilihan yang bersinggungan pada baris konektor yang sesuai mengikat area pencarian berbentuk kotak.



Gambar 7.2 Bagan yang sama seperti pada Gambar 7.1, tetapi dengan resolusi yang lebih tinggi. Oval berwarna menunjukkan data untuk 960 baja, paduan aluminium, dan komposit matriks polimer.

Materials for Light Pressure Vessel

Crack size $2a_c$ (mm)	Selected Material
0.1	Low alloy steel AISI 4340 tempered 206 ⁰ C
1	7150 aluminum alloy, T6 temper
10	Low alloy steel AISI 4135 tempered
100	Stainless steel AISI 3014, HT Grade B

7.2 Connecting Rods for High Performance Engines

Connecting rod dalam mesin berkinerja tinggi, kompresor, atau pompa adalah komponen penting. Untuk meminimalkan gaya inersia dan beban bantalan. Connecting rod harus dengan bobot ringan mungkin. Kondisi ini menyiratkan bahwa material harus ringan mungkin, material yang kuat, tegangan mendekati batas material. Ketika meminimalkan biaya adalah tujuannya, connecting rod sering terbuat dari besi cor karena sangat murah. Tetapi apa bahan terbaik untuk con-rod ketika tujuannya adalah untuk memaksimalkan kinerja?

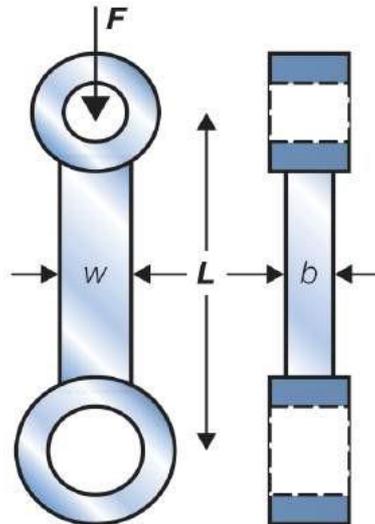
The design requirement: connecting rod

Function	Connecting rod for reciprocating engine or pump
Constraints	Must not fail by high-cycle fatigue Must not file by elastic buckling Stroke, and thus connecting rod length L, specified
Objectives	Minimize mass
Free variables	Cross section A Choice of material

Translasi. Kasus ini termasuk permasalahan “min-max”. Massa con-rod adalah:

$$m = \beta AL\rho$$

dimana, L = panjang con-rod, ρ = densitas material, A = luas penampang, β = konstanta pengali yang memungkinkan massa rumah bantalan.



Gambar 7.3 Connecting rod, tidak boleh buckling atau gagal karena lelah

Batasan fatigue adalah:

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_e$$

dimana σ_e adalah batas kelelahan material. Kedua persamaan di atas akan menghasilkan batasan lelah material, yaitu:

$$m_1 = \beta FL \left(\frac{\rho}{\sigma_e} \right)$$

maka indeks materialnya adalah:

$$M_1 = \frac{\rho}{\sigma_e}$$

Batasan tekuk (*buckling*) memerlukan beban tekan puncak yang tidak melebihi beban tekuk Euler:

$$F \leq \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

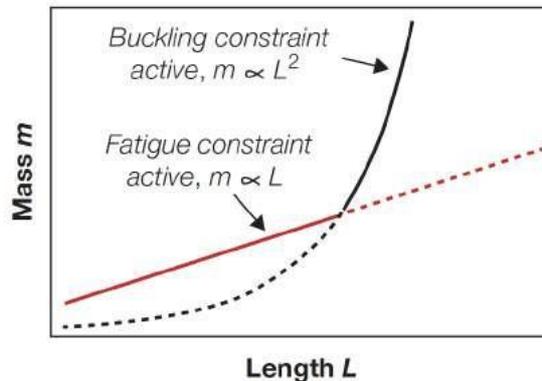
Dimana,

$$I = \frac{1}{12} b^3 w$$

Nilai $b = \alpha w$, dimana α adalah konstanta bentuk tak berdimensi yang mencirikan proporsional penampang dan menurunkan A dari persamaan sebelumnya akan diperoleh massa:

$$m_2 = \beta \left(\frac{12F}{\alpha \pi^2} \right)^{\frac{1}{2}} L^2 \left(\frac{\rho}{E \alpha} \right)$$

$$M_2 = \frac{\rho}{E^2}$$



Gambar 7.4 Persamaan massa con-rod sebagai fungsi L

Connecting rod harus aman digunakan dan memenuhi dua batasan material. Pada panjang tertentu L, batasan aktif adalah nilai m terbesar. Con-rod pendek bertanggung jawab atas kegagalan kelelahan, sedangkan yang panjang rentan terhadap buckling.

Pemilihan. Spesifikasi con-rod adalah $L = 200$ mm, $F = 50$ kN, $\alpha = 0.8$ dan $\beta = 1.5$.

Nilai m_1 adalah massa batang yang hanya memenuhi batasan kelelahan, dan m_2 adalah massa yang hanya memenuhinya batasan buckling. Untuk tiga material, batasan aktif adalah kelelahan dan buckling. Kuantitas yang berada di kolom terakhir adalah yang lebih besar dari m_1 dan m_2 untuk setiap material. Nilai tersebut adalah massa terendah yang memenuhi kedua batasan. Material dengan bobot paling ringan adalah yang memiliki \bar{m} terkecil, yaitu paduan titanium Ti-6Al-4V. Komposit matriks logam Duralcan 6061-20% SiC adalah pilihan kedua. Keduanya memiliki berat kurang dari setengah batang besi cor.

Langkah ini adalah salah satu cara tetapi bukan yang terbaik. Hal ini disebabkan oleh 2 asumsi, yaitu (1) beberapa prosedur "pemilihan" telah digunakan untuk mendapatkan material yang tercantum dalam tabel, tetapi tidak menjelaskan bagaimana hal ini harus dilakukan, (2) hasil hanya berlaku untuk nilai F dan L yang tercantum sebelumnya, jika diubah, maka pilihan juga berubah. Jika metode ini diabaikan maka dapat dilakukan dengan metode grafis.

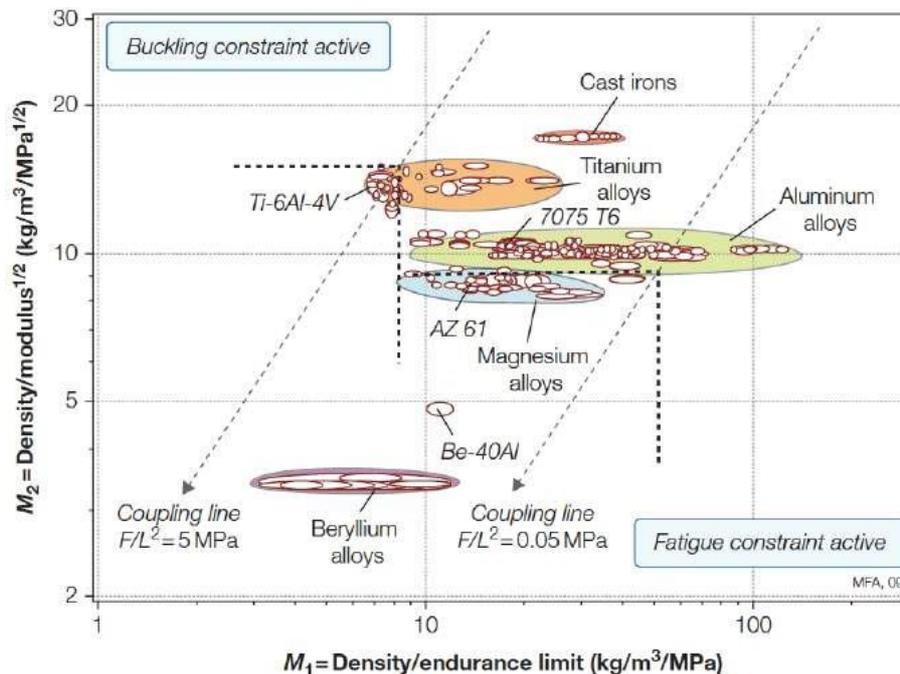
Material	ρ kg/m ³	E GPa	σ_e MPa	m_1 kg	m_2 kg	$\bar{m}=\max(m_1,m_2)$ kg
Nodular cast iron	7150	178	250	0.43	0.22	0.43
HSLA steel 4140 (o.q. T-315)	7850	210	590	0.20	0.28	0.28
Al S355.0 casting alby	2700	70	95	0.39	0.14	0.39
Duralcan Al-SiC (p) composite	2880	110	230	0.18	0.12	0.18
Titanium 6Al 4V	4400	115	530	0.12	0.17	0.17

Massa con-rod yang akan bertahan terhadap kelelahan dan buckling adalah yang lebih besar dari dua massa m_1 dan m_2 . Persamaan garis konektor adalah:

$$M_2 = \left[\left(\frac{\alpha \pi^2 F}{12 L^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] M_1$$

Besaran dalam kotak segiempat adalah konstanta konektor C_c .

Material dengan kombinasi optimal M_1 dan M_2 diidentifikasi dengan membuat diagram dengan indeks ini sebagai sumbu. Gambar 7.5 menggambarkan ini, menggunakan database paduan ringan, termasuk besi cor untuk perbandingan. Garis konektor untuk dua nilai F/L^2 diplot di atasnya, mengambil $\alpha = 0,7$. Dua pilihan ekstrem ditampilkan, satu mengisolasi subset terbaik ketika koefisien pembebanan struktural F/L^2 tinggi. Berilium dan paduannya muncul sebagai pilihan terbaik untuk semua nilai C_c dalam kisaran ini. Dengan mengesampingkannya, pilihan terbaik ketika F/L^2 besar ($F/L^2 = 5 \text{ MPa}$) adalah paduan titanium seperti Ti-6Al-4V. Untuk nilai rendah ($F/L^2 = 0,05 \text{ MPa}$), paduan magnesium seperti AZ61 menawarkan solusi yang lebih ringan daripada aluminium atau titanium.



Gambar 7.5 Konstruksi beberapa kendala untuk con-rod. Garis diagonal putus-putus memperlihatkan persamaan konektor untuk dua nilai ekstrem F/L^2 .

Materials for high performance con-rod

Material	Comment
Magnesium alloys	AZ61 and related alloys offer good all-around performance
Titanium alloys	Ti-6-4 is the best choice for high F/L^2
Beryllium alloys	The ultimate choice, but difficult to process and very expensive
Aluminum alloys	Cheaper than titanium or magnesium, but lower performance

Postscript. Con-rod dibuat dari material: aluminium dan magnesium pada mobil jalan, titanium dan berilium untuk mesin balap. CFRP dikeluarkan dari daftar karena tidak mudah merancang con-rod CFRP. Sangat penting menggunakan serat kontinu yang harus menutupi poros dan rumah bantalan. Poros harus memiliki proporsi serat yang tinggi yang terletak sejajar dengan arah di mana beban F bekerja.

7.3 Kaki-Kaki Meja

Pada pembahasan berikut adalah pemilihan material untuk kaki-kaki meja yang menggunakan kasus pada tujuan yang saling bertentangan. Persyaratan desain adalah sebagai berikut:

Design requirements for table legs

Function	Column (supporting compressive load)
Constraints	Length L specified Must not buckle under design loads Must not fracture if accidentally struck
Objectives	Minimize mass, m Maximize slenderness
Free variables	Diameter of legs, 2r Choice of material

Translasi

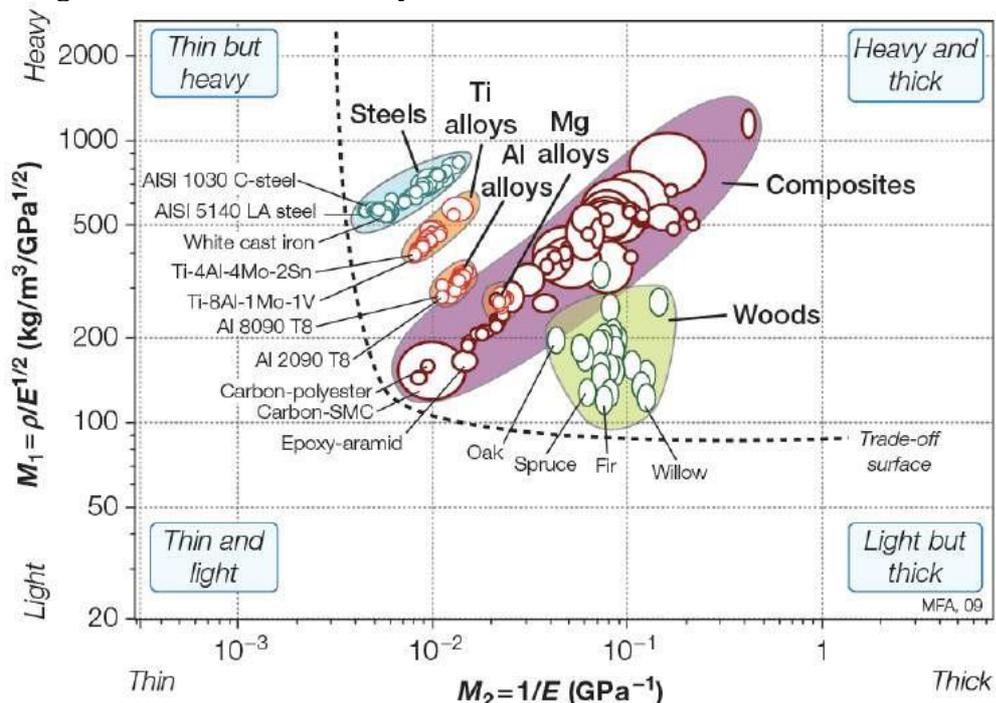
Kaki meja memerlukan 2 tujuan, yaitu kaki seringan mungkin dan setipis mungkin. Massa m kaki adalah:

$$M_1 = \frac{\rho}{E^{1/2}}$$

jika ketebalan kaki adalah 2r maka:

$$M = \frac{1}{E}$$

Snr. Tavolino ingin meminimalkan keduanya.



Gambar 7.6 Plot trade-off untuk kaki meja

Pemilihan Material

Cara yang tepat untuk mengatasi masalah multiobjektif seperti ini adalah dengan membuat plot trade-off. Gambar 7.6 adalah contoh: M_1 pada sumbu vertikal, M_2 pada sumbu horizontal. Untuk kejelasan, hanya paduan besi, paduan ringan, komposit, dan kayu yang muncul di plot

yang dapat dianggap sebagai material kandidat. Kelas-kelas berkerumun sangat ketat karena modulus dan kepadatan memiliki rentang yang sempit.

Kaki yang terbuat dari pohon cemara berpotensi lebih ringan daripada yang terbuat dari material lain. Komposit menawarkan material kaki yang ringan dan jauh lebih tipis. Tetapi bukan yang tertipis dari semua. Baja tidak lebih baik. Paduan ringan memungkinkan kaki yang lebih ringan dari baja tetapi tidak tipis. Secara keseluruhan, komposit menawarkan kompromi terbaik, yaitu bobot yang sangat rendah dan langsing.

Postscript. Bukankah kaki tubular akan lebih ringan? Lebih gemuk, tapi seberapa gemuk? Bukankah solusi tubular akan menjadi kompromi terbaik? Keadaan ini akan dibahas lebih detail pada pelajaran berikutnya.

7.4 Kaliper Rem Disk

Ketika material harus melakukan fungsi kritis, seperti di ruang angkasa (berilium untuk komponen struktural, iridium untuk skrining radiasi), dalam prosedur medis (pengisi gigi emas), dan peralatan olahraga yang sangat kompetitif (satu sepeda motor balap memiliki kepala silinder yang terbuat dari perak padat untuk konduktivitas termal yang tinggi).

Translasi

Kaliper rem dapat dianggap sebagai dua balok panjang L , kedalaman b , dan ketebalan h , dikunci bersama di ujungnya (Gambar 7.7). Setiap balok dibebani lenturan ketika pengereman dilakukan. Akibat pengereman maka menghasilkan panas. Skema bawah mewakili salah satu balok. Panjangnya L dan kedalaman b ditentukan. Kekakuan balok S sangat penting. Jika kekakuan tidak memadai maka kaliper akan melentur yang dapat mengganggu efisiensi pengereman dan memungkinkan terjadinya getaran. Kaliper harus mampu meneruskan panas juga. Berikut adalah persyaratan desain caliper rem cakram.

Design requirements for brake caliper

Function	Brake caliper
Constraints	Bending stiffness S^* specified Dimensions L and b specified
Objectives	Minimize mass of caliper, m Maximize heat transfer through caliper
Free variables	Thickness h of caliper wall Choice of material

Massa kaliper salah satu balok sederhana adalah:

$$m_a = h\rho \text{ (unit: kg/m}^2\text{)}$$

dimana, ρ adalah densitas material. Perpindahan panas tergantung pada konduktivitas termal λ material balok, maka heat fluks per satuan luas adalah:

$$q_a = \lambda \frac{\Delta T}{h} \text{ (unit: watts/m}^2\text{)}$$

dimana, ΔT adalah perbedaan suhu antara permukaan. Nilai L , b dan ΔT ditentukan. Variable bebasnya adalah ketebalan balok h , tetapi memiliki satu batasan. Caliper harus cukup kaku untuk menjamin tidak melentur atau mengalami getaran berlebihan. Untuk mencapai kekakuan yang dimaksud maka diperlukan sebesar:

$$S = \frac{C_1 EI}{L^3} = \frac{C_1 E b h^3}{12 L^3} \geq S^* \text{ (unit: N/m)}$$

Dimana S^* adalah kekakuan yang diinginkan, E adalah modulus Young, C_1 adalah konstanta yang tergantung pada distribusi beban dan $I = bh^3/12$ adalah momen luasan kedua dari balok tersebut.

$$h \geq \left(\frac{12 S^*}{C_1 b E} \right)^{1/3} L$$

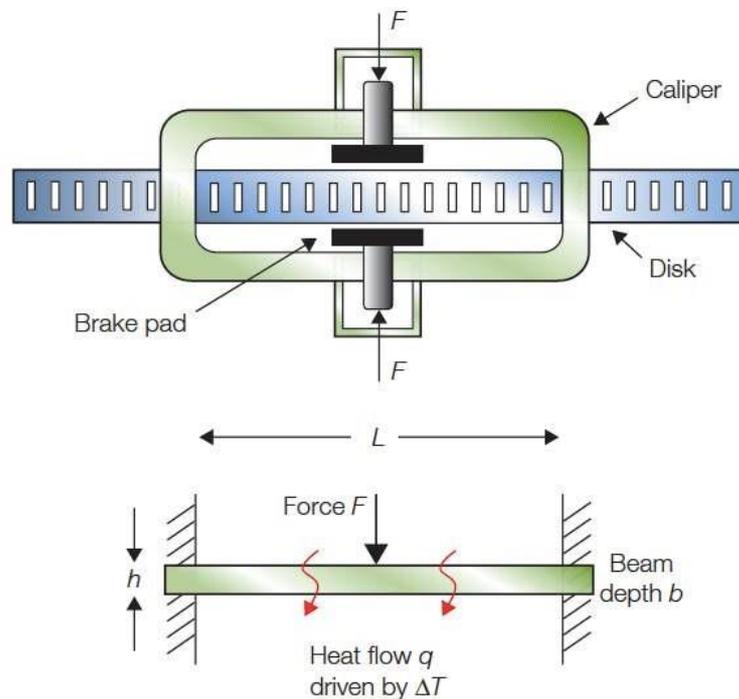
maka massa m_a dari lengan dan panas yang diteruskan per satuan luas adalah:

$$m_a \geq \left(\frac{12 S^*}{C_1 b E} \right)^{1/3} L \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right) \text{ (unit: kg/m}^2\text{)}$$

$$q_a = \frac{\Delta T}{L} \left(\frac{C_1 b}{12 S^*} \right)^{1/3} (\lambda E^{1/3}) \text{ (unit: W/m}^2\text{)}$$

Persamaan pertama merupakan indeks material, yaitu:

$$M_1 = \frac{\rho}{E^{1/3}}$$



Gambar 7.7 Skema caliper rem. Lengan caliper yang panjang dibebani lentur dan harus dapat mengantarkan panas untuk mencegah panas berlebih.

Persamaan kedua mengandung indeks material yaitu:

$$M_2 = \frac{1}{\lambda E^{1/3}}$$

Material standar untuk caliper rem adalah nodular cast iron dengan harga murah dan kaku tetapi relative berat dan bukan penghantar panas yang baik.

$$\frac{m_a}{m_{a,0}} = \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \left(\frac{E_o^{1/3}}{\rho_o} \right)$$

dan

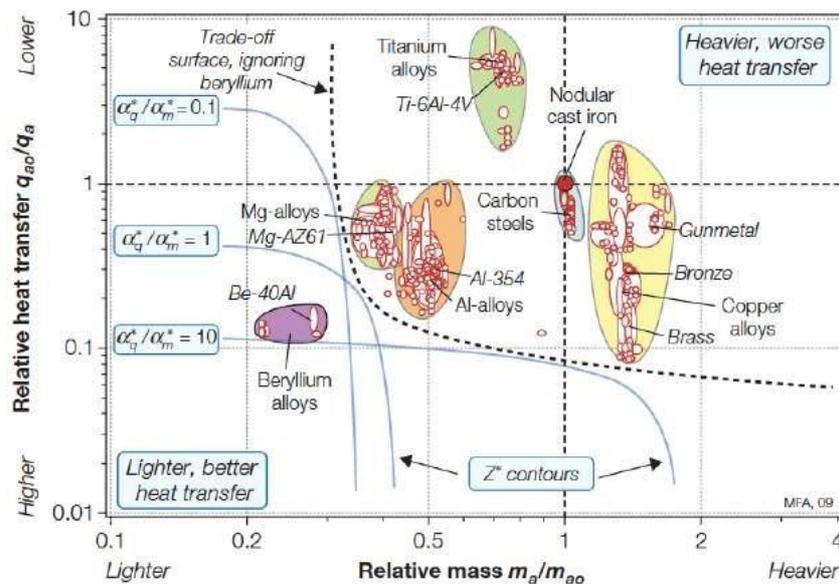
$$\frac{q_{a,0}}{q_a} = \frac{\lambda_o E_o^{1/3}}{\lambda E^{1/2}}$$

Persamaan untuk q_a telah terbalik sehingga pilihan material terbaik adalah yang meminimalkan kedua hal ini. Material yang berada di kiri bawah lebih baik daripada besi cor dengan kedua tujuan. Kaliper aluminium memiliki setengah berat dan menawarkan perpindahan panasnya 2 kali lebih besar. Pilihan utama adalah berilium atau paduannya Be 40% Al.

Untuk melangkah lebih jauh, kami merumuskan fungsi penalti relative:

$$Z^* = \alpha_m^* \left(\frac{m_a}{m_{a,0}} \right) + \alpha_q^* \left(\frac{q_{a,0}}{q_a} \right)$$

Konstanta pertukaran α_m^* dan α_q^* adalah ukuran relatif dari menurunkan berat atau meningkatkan perpindahan panas relatif terhadap besi cor.



Gambar 7.8 Berilium dan paduannya adalah pilihan yang terbaik, meminimalkan massa dan memaksimalkan perpindahan panas. Tetapi jika eksotis ini dikecualikan, pilihan menjadi tergantung pada rasio α_m^*/α_q^* .

Gambar 7.8 untuk tiga nilai dari rasio α_m^*/α_q^* konstanta pertukaran. Masing-masing

bersinggungan dengan permukaan trade-off yang mengecualikan paduan berilium "eksotis", yang sebaliknya mendominasi pilihan untuk semua nilai. Untuk $\alpha_m^*/\alpha_q^* = 0.1$ berarti terdapat

pengurangan massa menjadi factor utama, maka pilihan terbaik adalah paduan magnesium. Jika pengurangan massa dan perpindahan panas diberikan bobot yang sama ($\alpha_m^*/\alpha_q^* = 1$),

maka paduan aluminium menjadi pilihan yang baik. Jika perpindahan panas adalah

pertimbangan utama ($\alpha_m^* / \alpha_q^* = 10$), maka paduan tembaga adalah material yang paling memenuhi. Dari banyaknya pilihan tersebut, maka berilium adalah material terbaik.

Postscript. Ferrari Racing pada suatu waktu melakukan komisioning caliper rem berilium. Hari ini pembatasan material, diberlakukan untuk membuat Formula 1 lebih kompetitif.

7.5 Ringkasan

Sebagian besar desain memiliki batasan yang kuat. Material secara bersamaan harus memenuhi beberapa persyaratan yang bersaing, dan sering bertentangan. Tetapi meskipun terdapat konflik, seleksi yang optimal masih mungkin terjadi. Metode "batasan aktif" memungkinkan pemilihan materi yang secara optimal memenuhi dua atau lebih kendala.

Tantangan yang lebih besar muncul ketika desain harus memenuhi dua tujuan yang bertentangan atau lebih (seperti meminimalkan massa, volume, biaya, dan dampak lingkungan). Untuk itu dibutuhkan cara untuk mengekspresikan semua tujuan dalam satuan yang sama. Faktor konversi disebut "konstanta pertukaran." Menetapkan nilai konstanta pertukaran adalah langkah penting dalam menyelesaikan masalah.

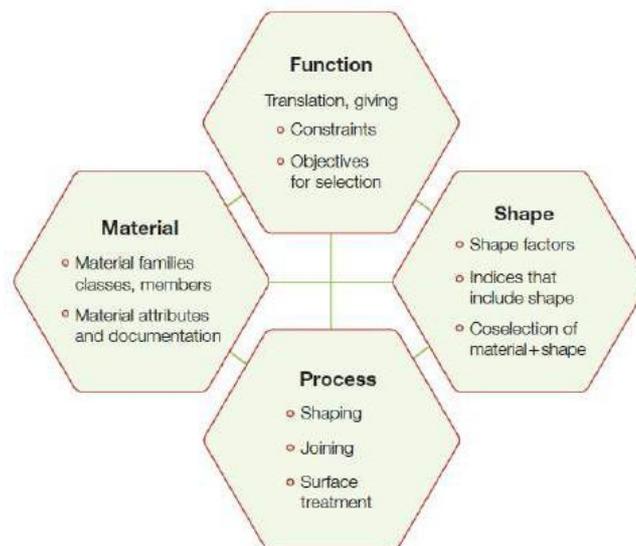
PROSES DAN PEMILIHAN PROSES

Proses adalah metode membentuk, menggabung, atau finishing material. Pengecoran pasir, cetakan injeksi, pengelasan fusi, dan pemolesan elektro adalah semua proses. Pemilihan komponen ditentukan dari bahan yang akan digunakan, ukuran, bentuk, ketepatan yang diperlukan, dan berapa jumlah yang harus dibuat pada persyaratan desain.

Untuk memilih proses maka perlu untuk mengklasifikasikannya. Gambar 8.2 menunjukkan perkembangan klasifikasi proses. Gambar 8.3 menunjukkan keluarga proses dan atributnya, seperti: bahan yang dapat ditangani, bentuk yang dapat dibuat, dan presisi yang dapat dilakukan.

Pemrosesan memiliki fungsi ganda. Yang pertama adalah membentuk, menggabung, dan finishing. Yang kedua adalah mengendalikan properti. Logam dapat diperkuat dengan rolling dan forging. Baja diberikan perlakuan panas untuk meningkatkan kekerasan dan ketangguhan. Polimer ditarik (*drawn*) untuk meningkatkan modulus dan kekuatan. Keramik ditekan panas untuk meningkatkan kekuatan.

Pemilihan proses adalah menemukan kecocokan terbaik antara atribut proses dan persyaratan desain. Korelasi antara material, bentuk dan pemrosesan ditunjukkan oleh Gambar 8.1. Properti material dan bentuk membatasi pilihan proses: Bahan ulet dapat ditempa, dirol, dan ditarik (*drawn*). Material yang rapuh dapat dibentuk menggunakan metode bubuk. Bahan yang meleleh pada suhu sederhana hingga cairan rendah viskositas dapat dicor.



Gambar 8.1 Korelasi antara material, fungsi, bentuk dan proses

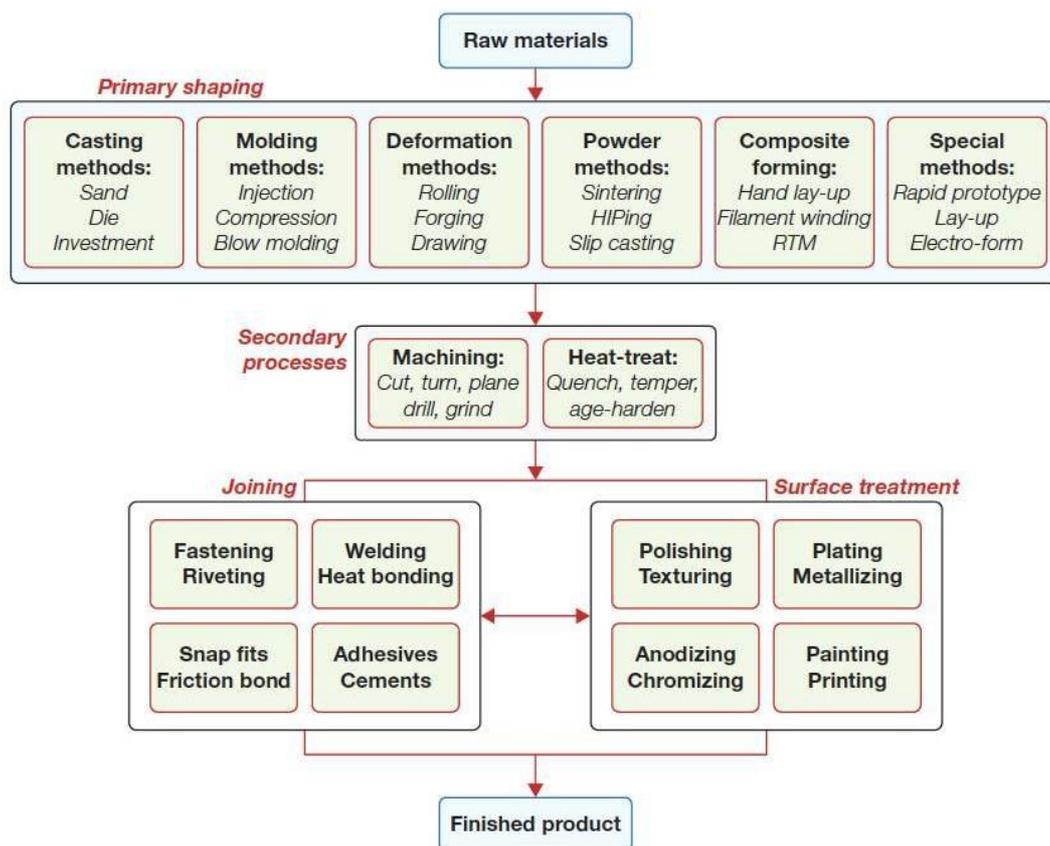
Bentuk juga dapat mempengaruhi pilihan proses. Bentuk yang ramping dapat dibuat dengan mudah melalui rolling atau drawing tetapi tidak dengan casting. Bentuk berongga tidak dapat dibuat dengan tempa, tetapi bisa dengan casting atau molding. Pemrosesan mempengaruhi sifat material. Rolling dan forging mengubah kekerasan dan tekstur logam dan

menyelaraskan inklusi yang dikandungnya, meningkatkan kekuatan dan keuletannya. Perlakuan panas memungkinkan untuk manipulasi kekuatan, keuletan, dan ketangguhan.

Sebagaimana dalam aspek desain, pemilihan proses adalah prosedur iteratif. Iterasi pertama memberikan satu atau lebih rute proses. Pilihan akhir didasarkan pada perbandingan biaya proses dan dokumentasi: pedoman, riwayat kasus, dan contoh rute proses yang digunakan untuk produk terkait. Dokumentasi juga membantu dalam menangani penghubung antara proses dan sifat material.

8.1 Klasifikasikan Proses

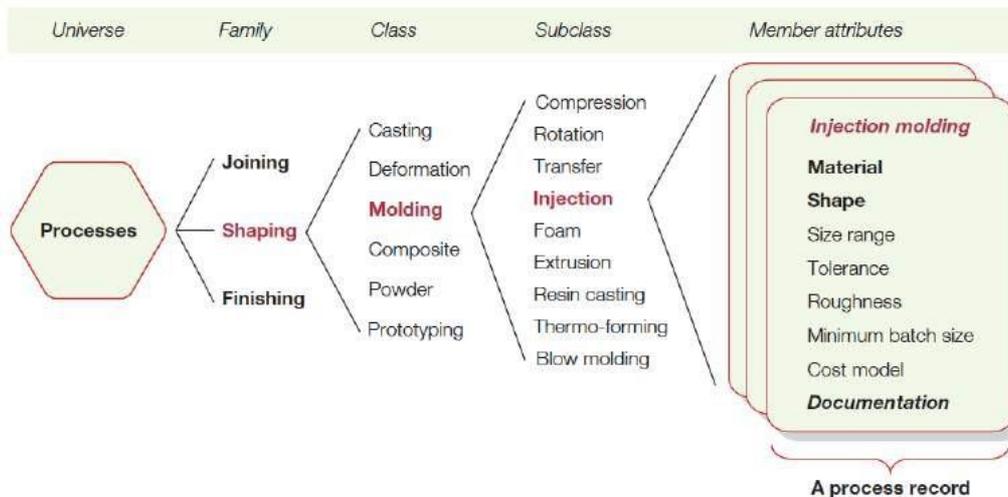
Proses manufaktur dapat diklasifikasikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.2. Tujuan utama pembentukan adalah membuat bentuk. Baris pertama menunjukkan enam kelas proses pembentukan primer: pengecoran, cetakan, deformasi, metode bubuk, metode untuk membentuk komposit, dan metode khusus seperti prototyping cepat. Proses sekunder mengubah bentuk dan sifat material. Proses skunder adalah "**permesinan**" yang menambahkan fitur ke bodi yang sudah berbentuk, dan "**perlakuan panas**" yang meningkatkan sifat permukaan.



Gambar 8.2 Kelas proses. Baris pertama terdiri dari keluarga proses pembentukan. Baris di bawahnya adalah proses permesinan dan perlakuan panas yang diikuti oleh keluarga proses penyambungan dan finishing (perlakuan permukaan).

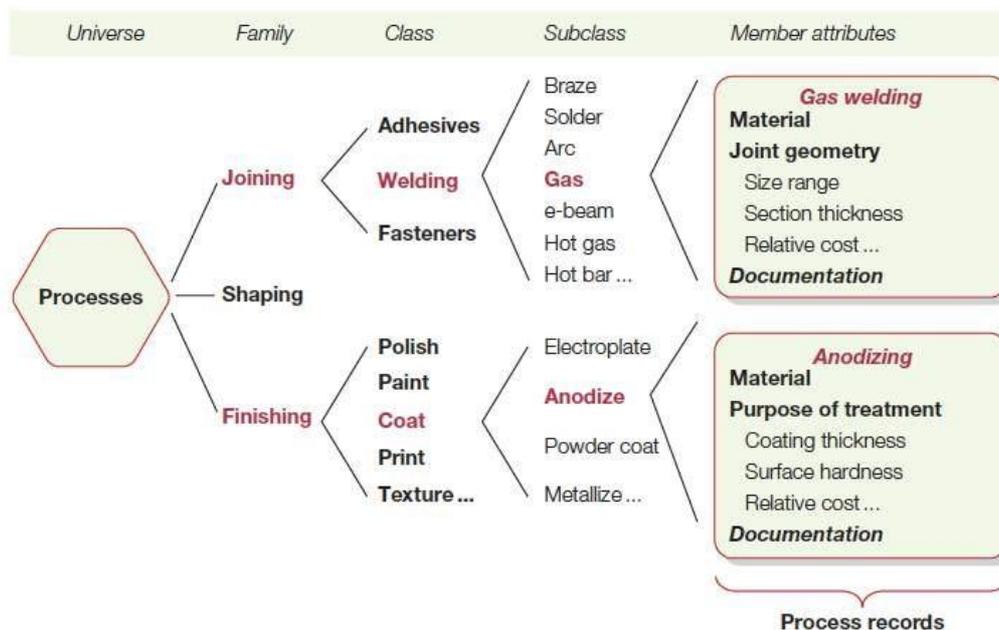
Gambar 8.3 menunjukkan proses yang memiliki tiga keluarga: membentuk, assembling, dan finishing. Setiap keluarga menunjukkan kelas: casting, deformasi molding, dan sebagainya.

Molding akan menunjukkan sub kelas: rotation molding, blow molding, injection molding, dan sebagainya. Masing-masing memiliki atribut tertentu: bahan yang dapat ditanganinya, bentuk yang dapat dibuatnya, ukurannya, presisi, dan ukuran yang optimal.



Gambar 8.3 Taksonomi proses dengan keluarga pembentukan. Setiap anggota ditandai dengan seperangkat atribut. Pemilihan proses melibatkan kesesuaian ini dengan persyaratan desain.

Keluarga pengecoran (*casting*) dapat diturunkan lagi menjadi beberapa proses, yaitu: sand casting, shaping-casting, die casting dan investment casting. Sedangkan penyambungan (*joining*) terdiri dari: adhesives, welding, fastener (rivets and staples, threaded fastener, sewing, snap fits).

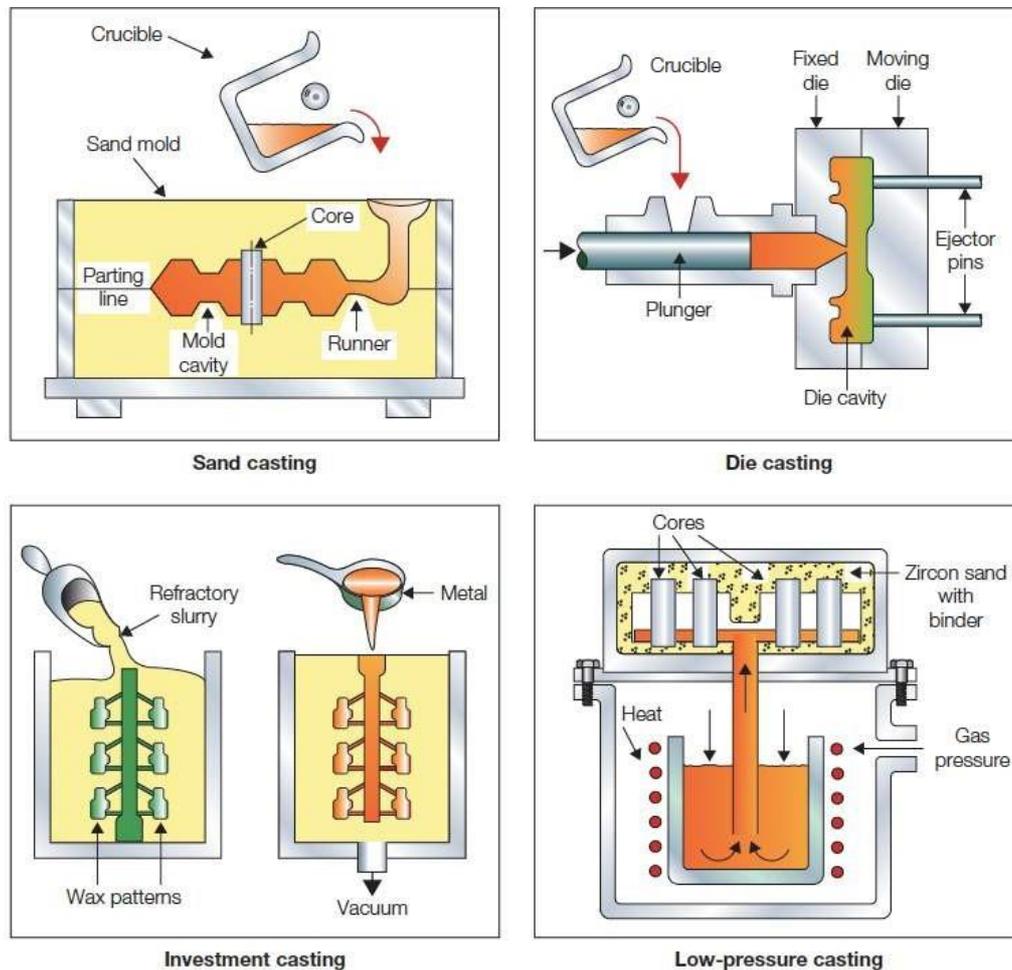


Gambar 8.4 Keluarga penyambungan dan finishing

8.2 Proses: Pembentukan, Joining, Finishing

Proses pembentukan. Dalam pengecoran (Gambar 8.5), cairan dituangkan atau dipaksa masuk ke dalam cetakan di mana cairan logam akan membeku dengan pendinginan. Pengecoran dibedakan dari cetakan (*molding*) berdasarkan viskositas cairan yang rendah. Pada

gravity sand dan investment casting, cairan logam mengisi cetakan dengan mengalir karena beratnya sendiri. Cetakan pasir (*sand mold*) adalah salah satu pengecoran yang murah. Cetakan logam untuk die casting relatif mahal.



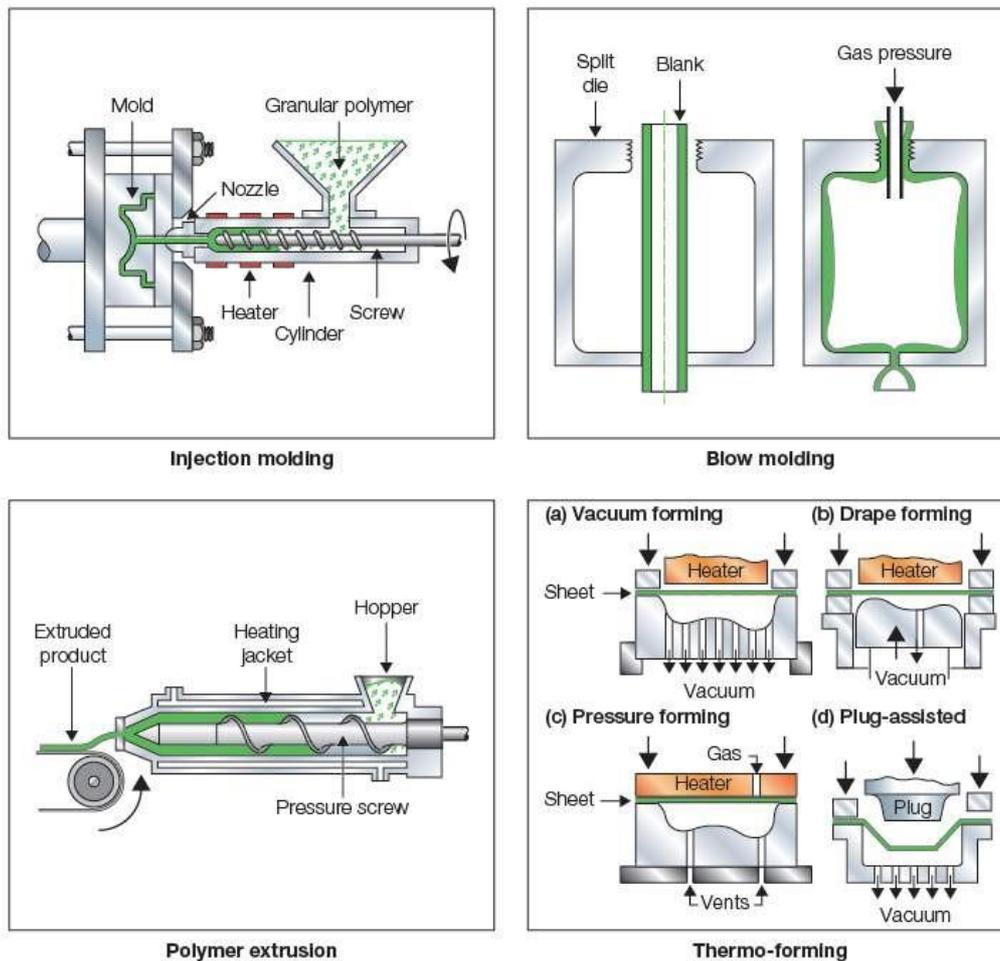
Gambar 8.5 Proses casting. Dalam pengecoran pasir, logam cair dituangkan ke dalam cetakan pasir yang terbelah. Dalam die casting, cairan dipaksa oleh tekanan ke dalam cetakan logam. Dalam *investment casting*, pola lilin tertanam dalam refractory, meleleh dan logam akan mengisi dalam rongga. Dalam pengecoran tekanan, cetakan diisi dari bawah, memberikan kontrol atmosfer dan aliran logam ke dalam cetakan.

Bentuk cor harus dirancang agar cairan logam mudah mengalir ke semua bagian cetakan. Agar saat solidifikasi tidak terjadi kavitas penyusutan maka harus dihindari terbentuknya kantong cairan dalam cangkang padat. Bila memungkinkan, ketebalan bagian dibuat seragam (ketebalan bagian yang berdampingan tidak boleh berbeda lebih dari faktor 2). Bentuknya dirancang sehingga pola dan pengecoran akhir dapat dilepaskan dari cetakan. Bentuk pasak (*keyed*) sebaiknya dihindari karena dapat menyebabkan "robek panas" (*a tensile creep fracture*) saat mendingin dan menyusut.

Ketika logam dituangkan ke dalam cetakan, alirannya bergejolak dan menjebak oksida permukaan dan puing-puing di dalam pengecoran sehingga dapat menyebabkan cacat pengecoran. Hal ini dapat dihindari dengan mengisi cetakan dari bawah sedemikian rupa

sehingga aliran laminar, didorong oleh tekanan vakum atau gas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.5.

Molding. Figure 8.6 menunjukkan casting yang disesuaikan dengan material yang sangat kental ketika mencair, terutama termoplastik dan gelas. Cairan panas dan kental ditekan atau diinjeksikan ke dalam cetakan di bawah tekanan yang cukup besar, di mana ia mendingin dan membeku. Cetakan harus mampu menahan tekanan, suhu, dan keausan secara berulang-ulang. Blow molding menggunakan tekanan gas untuk mengekspansi polimer atau gelas ke luar yang cetakan yang terpisah. Ini adalah proses yang cepat dan murah yang sangat cocok untuk produksi suku cadang secara massal. Polimer, seperti logam, dapat diekstrusi, batang, tabung, dan bagian prismatik lainnya dapat dibuat dengan cara ini.

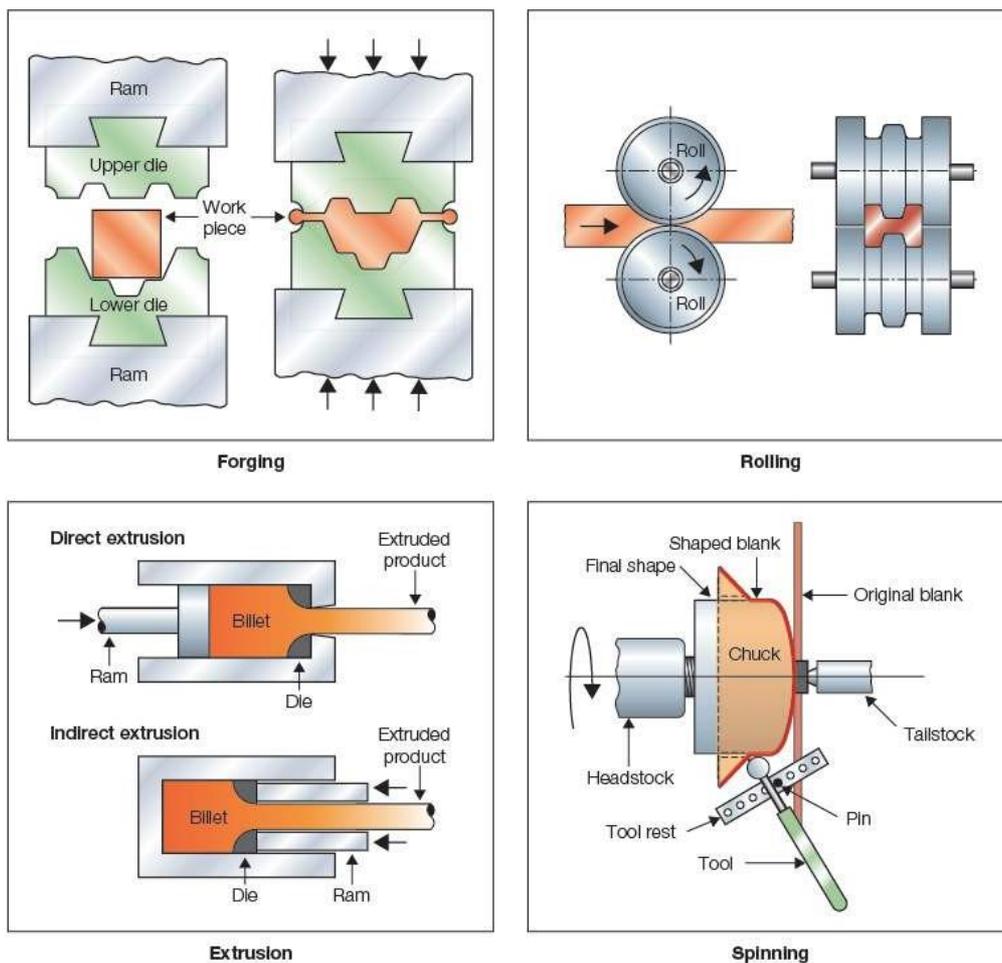


Gambar 8.6 Proses pencetakan. Dalam cetakan injeksi, polimer granular dipanaskan, dikompresi, dan digeser dengan pengumpan sekrup, memaksanya ke dalam rongga cetakan.

Pemrosesan Deformasi. Gambar 8.7 menunjukkan bahwa proses deformasi bisa panas, hangat, atau dingin. Ekstrusi, tempa panas, dan roll panas ($T > 0.55T_m$) memiliki banyak kesamaan dengan molding, meskipun materialnya benar-benar padat, bukan cairan kental. Suhu tinggi menurunkan kekuatan luluh dan memungkinkan rekristalisasi secara simultan, yang keduanya menurunkan tekanan pembentukan. *Warm working* ($0.35T_m < T < 0.55T_m$)

memungkinkan pemulihan tetapi tidak terjadi rekristalisasi. Penempaan dingin, rolling, dan drawing ($T < 0,35T_m$) mengeksploitasi *work hardening* untuk meningkatkan kekuatan produk akhir.

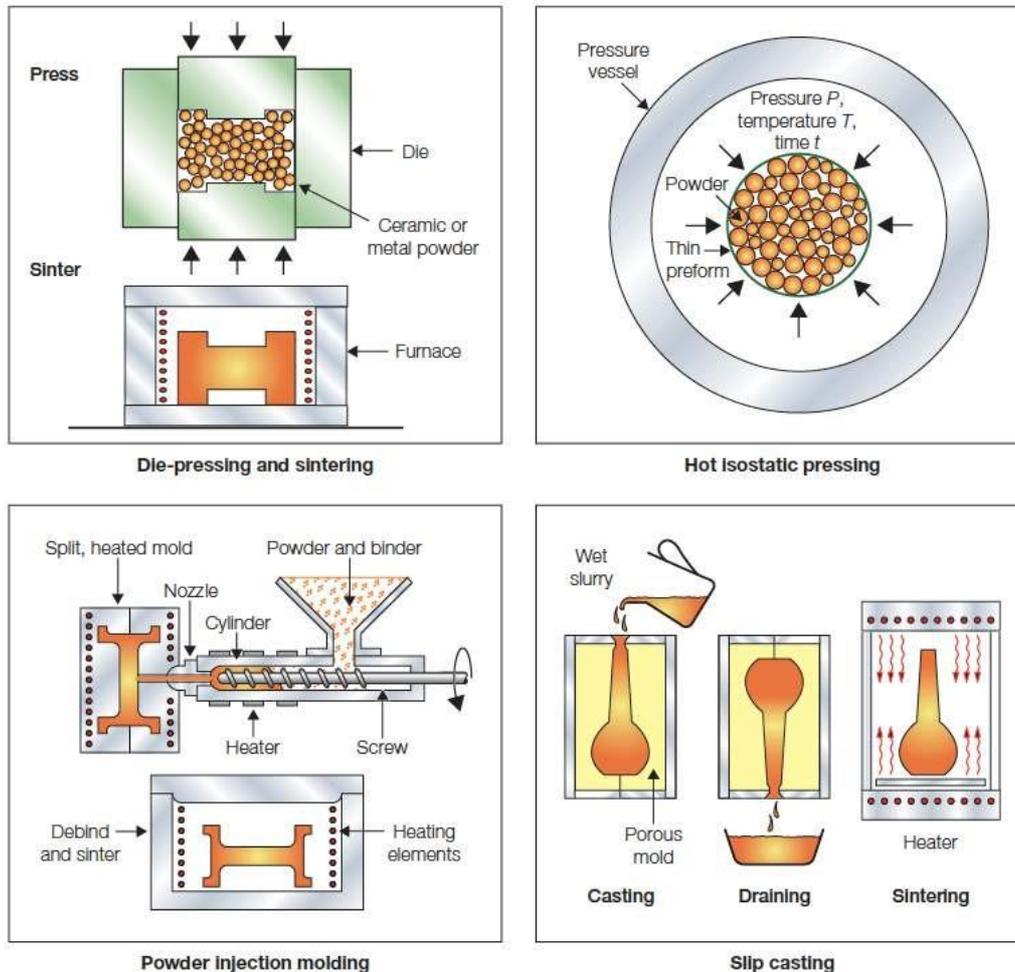
Bagian yang ditempa dirancang untuk menghindari perubahan ketebalan secara mendadak dan radius kelengkungan yang tajam karena keduanya membutuhkan strain lokal besar yang dapat menyebabkan bahan robek atau melipat kembali pada dirinya sendiri ("lapping"). Penempaan logam panas memungkinkan perubahan bentuk yang lebih besar tetapi umumnya memberikan permukaan dan toleransi yang buruk karena oksidasi dan warpage. Penempaan dingin memberikan presisi dan penyelesaian yang lebih besar, tetapi menempa tekanan lebih tinggi dan deformasi dibatasi oleh *work hardening*.



Gambar 8.7 Proses deformasi.

Dalam penempaan, logam dibentuk di antara dua cetakan yang dipegang di rahang press. Dalam rolling, billet atau batang logam direduksi penampangnya dengan deformasi kompresif antara roll. Dalam ekstrusi, logam dipaksa mengalir melalui lubang cetakan untuk memberikan bentuk prismatik secara terus menerus. Ketiga prosesnya bisa panas ($T > 0.85T_m$), hangat ($0.55T_m < T < 0.85T_m$), atau dingin ($T < 0.35T_m$).

Metode Bubuk. Gambar 8.8 menunjukkan bahwa metode bubuk membuat bentuk dengan menekan dan kemudian menyinter partikel halus dari material. Bubuk dapat ditekan dingin dan disintering (dipanaskan hingga $0.8T_m$ untuk memberikan ikatan difusi). Dapat juga ditekan dalam cetakan yang dipanaskan ("*die pressing*"), atau dipanaskan di bawah tekanan hidrostatis ("*hot isostatic pressing*" atau "HIP"). Logam yang titik lelehnya terlalu tinggi mencair dan terlalu kuat untuk diubah bentuk dapat dibuat dengan metode kimia, yaitu dengan mengubah menjadi bubuk dan kemudian dibentuk dengan *powder methods*.



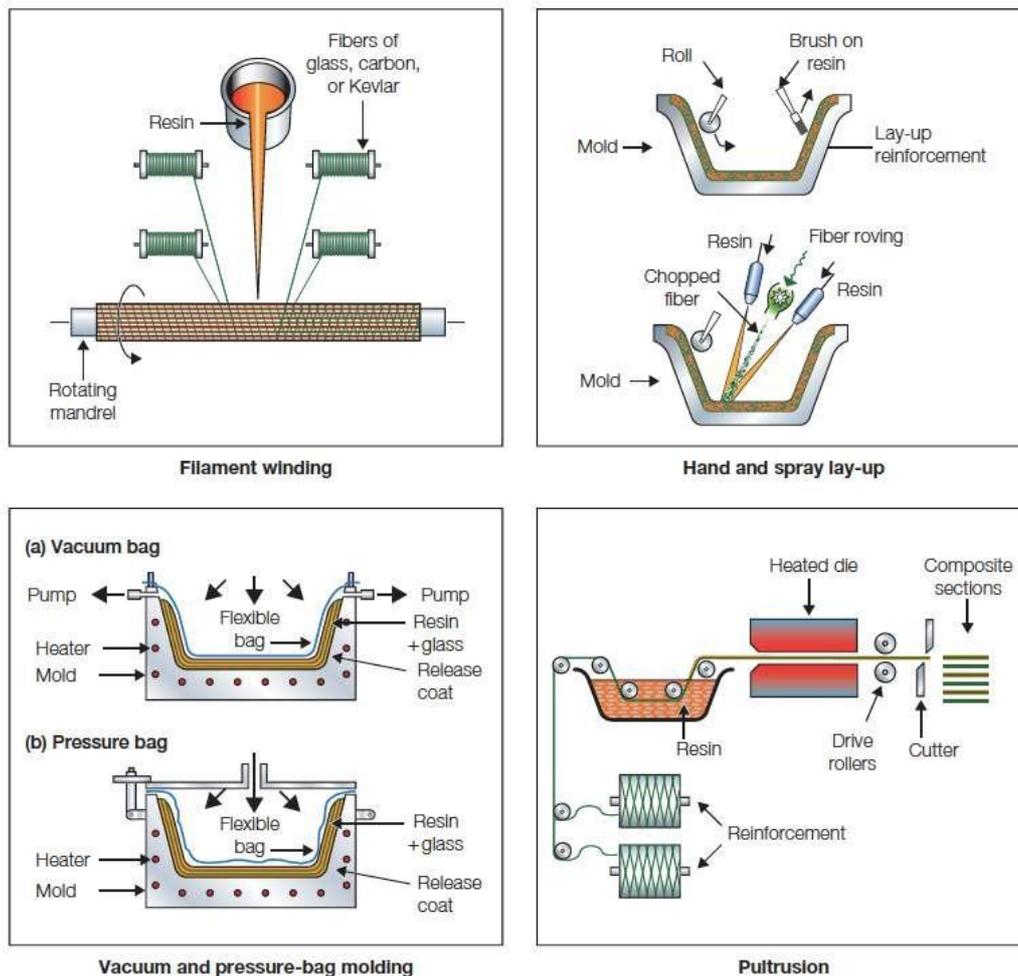
Gambar 8.8 Proses metalurgi serbuk

Pengolahan bubuk paling banyak digunakan untuk pembuatan komponen logam yang kecil, seperti roda gigi dan bantalan untuk mobil dan peralatan. Cara ini lebih hemat dalam penggunaan material dan sedikit proses finishing, yang tidak dapat dicor, dideformasi atau dimesin. Karena tekanan tidak dapat ditransmisikan secara seragam, maka panjang komponen tidak boleh melebihi 2.5 kali diameternya. Penampang harus dibuat hampir seragam karena bubuk tidak dapat mengalir ke bagian-bagian bersudut dengan mudah. Bentuknya harus sederhana agar mudah diekstraksi dari cetakan.

Keramik, sulit dicor dan tidak mungkin dibentuk maka dapat digunakan metode bubuk. Dalam *slip casting*, bubur bubuk berair dituangkan ke dalam cetakan plester. Dinding cetakan menyerap air. Dalam cetakan injeksi bubuk, bubuk keramik dengan pengikat polimer dibentuk

dengan cara konvensional, bagian yang dicetak dibakar, membakar pengikat dan menyinter bubuk.

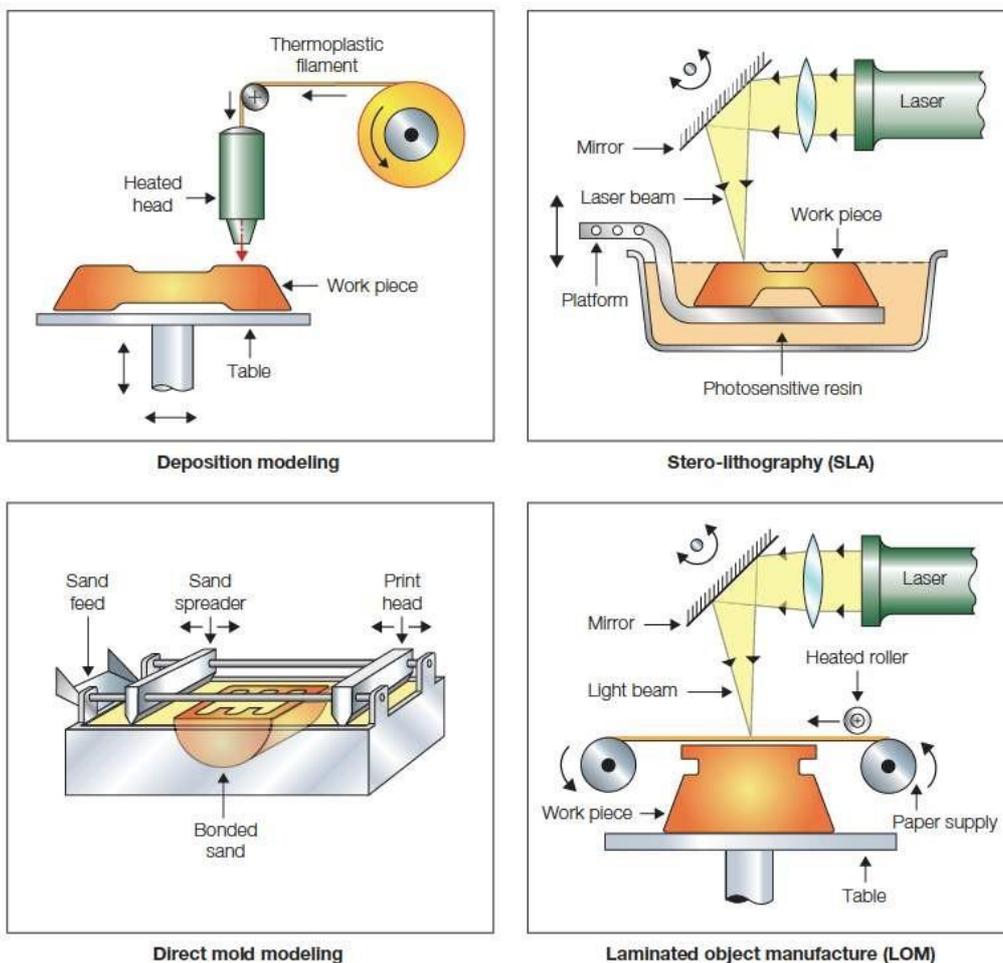
Metode Pembentukan Komposit. Gambar 8.9 menunjukkan proses pembuatan komposit polimer-matriks diperkuat dengan serat kontinu atau chop. Komponen yang besar dibuat dengan filamen yang berliku atau dengan *lay up* serat karbon, kaca, atau Kevlar hingga ketebalan dan penekanan yang diperlukan. Komponen yang sering diproduksi (bumper mobil, raket tenis) terbuat dari komposit serat chop dengan penekanan dan pemanasan "adonan" resin yang mengandung serat, yang dikenal sebagai *bulk molding compound (BMC)* atau *sheet molding compound (SMC)* di dalam cetakan atau dengan cetakan injeksi untuk campuran yang agak lebih cair ke dalam cetakan.



Gambar 13.9 Metode pembentukan komposit.

Sistem Prototyping Cepat (RPS) memungkinkan bentuk kompleks dapat dibuat dari data numerik yang dihasilkan oleh perangkat lunak pemodelan solid CAD (lihat Gambar 8.10). Semua RPS dapat menciptakan bentuk yang kompleks dan besar dengan kavitas internal, overhang, dan fitur transversal. Meskipun presisi, saat ini terbatas pada $\pm 0,3$ mm. Semua metode RP membangun bentuk berlapis-lapis, lebih seperti pencetakan tiga dimensi, dan lambat (biasanya 4–40 jam per unit). Setidaknya ada enam kelas, yaitu:

1. Bentuknya dibangun dari termoplastik yang diumpukan ke kepala pemindaian tunggal yang memancarkannya seperti lapisan tipis pasta gigi (pemodelan deposisi menyatu atau FDM), memancarkannya sebagai tetesan kecil (pembuatan partikel balistik, BPM), atau mengeluarkannya dalam array berpola seperti printer bubble-jet ("pencetakan 3D").
2. Polimerisasi yang diinduksi laser yang dipindai dari monomer yang sensitif terhadap foto (stereo-litografi atau SLA). Setelah setiap pemindaian, potongan kerja diturunkan secara bertahap, memungkinkan monomer baru untuk menutupi permukaan.
3. Pemotongan laser yang dipindai dari elemen kertas. Setiap lapisan tipis kertas dipotong oleh sinar laser dan terikat panas ke lapisan berikutnya.
4. Teknologi berbasis layar seperti yang digunakan untuk menghasilkan microcircuits (*solid ground curing, SGC*). Sukses layar mengakui sinar UV untuk mempolimerisasi monomer yang sensitif terhadap foto, membangun bentuk berlapis-lapis.

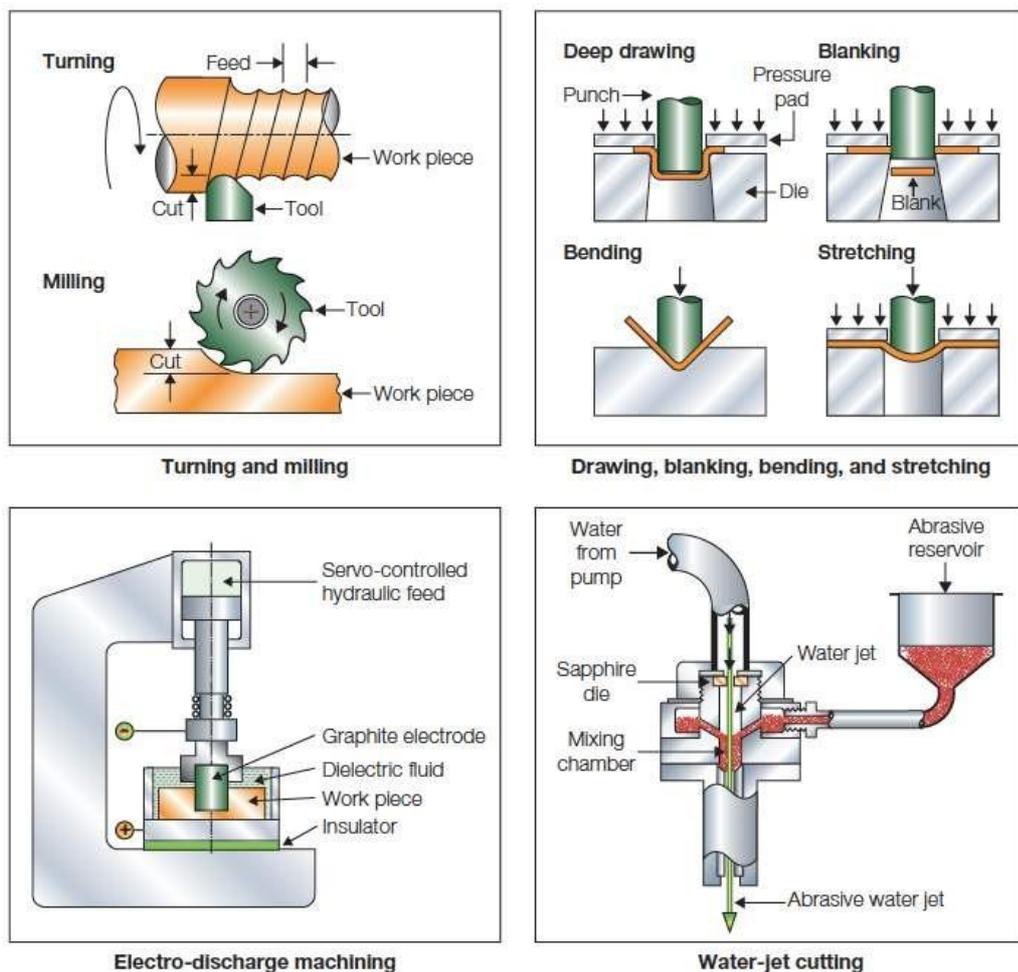


Gambar 8.10 Prototyping cepat

5. Selected laser sintering (SLS) memungkinkan komponen untuk dibuat langsung dalam termoplastik, logam, atau keramik. Laser, seperti di SLA, memindai tempat partikel, sintering lapisan permukaan tipis di mana balok menabrak. Lapisan partikel baru disapu di permukaan dan langkah laser-sintering diulang-ulang, membentuk benda 3D.

6. Cetakan pasir terikat menawarkan kemampuan untuk membuat komponen logam kompleks yang besar dengan mudah. Di sini kepala cetak multi-jet menyemprotkan pengikat ke tempat pasir pengecoran longgar, membangun bentuk cetakan seperti yang dilakukan sintering laser yang dipilih, tetapi lebih cepat. Ketika selesai, cetakan diangkat dari pasir yang longgar yang tersisa dan digunakan dalam proses pengecoran konvensional.

Operasional Permesinan. Hampir semua komponen rekayasa, baik yang terbuat dari logam, polimer, atau keramik akan mengalami permesinan (Gambar 8.11) selama pembuatan. Untuk mewujudkan hal ini, maka mesin harus dirancang untuk mencekam dan jigging dengan mudah dan menjaga simetri tetap tinggi. Penampang simetris akan membutuhkan lebih sedikit operasi. Kemampuan dimesin (*machinability*) adalah ukuran kemudahan untuk dikerjakan pada mesin: kemudahan pembentukan chip, kemampuan memberikan permukaan yang halus, dan kemampuan memberikan umur alat yang ekonomis. Semakin buruk *machinability* maka biayanya akan semakin tinggi.

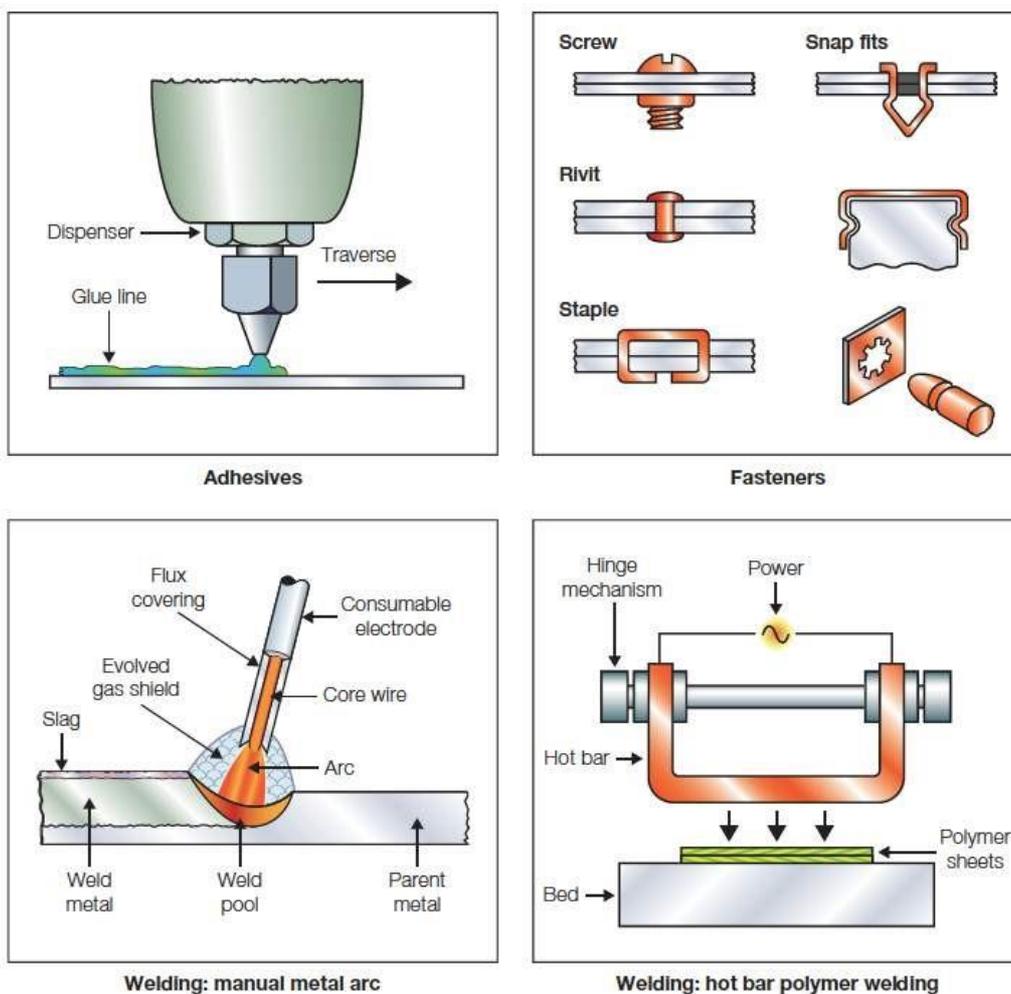


Gambar 8.11 Operasional permesinan

Sebagian besar polimer dibentuk menjadi bentuk akhir. Polimer dapat dimesin tetapi modulusnya rendah yang berarti polimer akan melentur secara elastis selama operasi

pemesinan dan membatasi toleransi. Keramik dan kaca dapat digerinda dan diputar ke toleransi dan finishing yang tinggi. Teknik permesinan "khusus" dengan aplikasi tertentu termasuk: *electro-discharge machining* (EDM), ultrasonic cutting, chemical milling, pemotongan dengan air dan jet pasir dan sinar laser.

Pembentukan lembaran logam melibatkan *punching*, *bending*, dan peregangan (*stretching*). Lubang tidak dapat di-*punch* menjadi diameter yang kurang dari ketebalan pelatnya. Radius minimum di mana lembaran dapat ditekuk, kemampuan bentuknya, kadang-kadang diekspresikan dalam kelipatan ketebalan lembaran t . Nilai 1 bagus; salah satu dari 4 rata-rata. Radius paling baik dibuat sebesar mungkin, dan tidak pernah kurang dari t . Formability juga menentukan jumlah lembaran yang dapat diregangkan atau ditarik tanpa terjadi necking atau gagal. Diagram batas pembentukan memberikan informasi yang lebih tepat, yang menunjukkan kombinasi strain utama dalam bidang lembaran yang akan menyebabkan kegagalan. Bagian ini dirancang sehingga strain tidak melebihi batasnya.

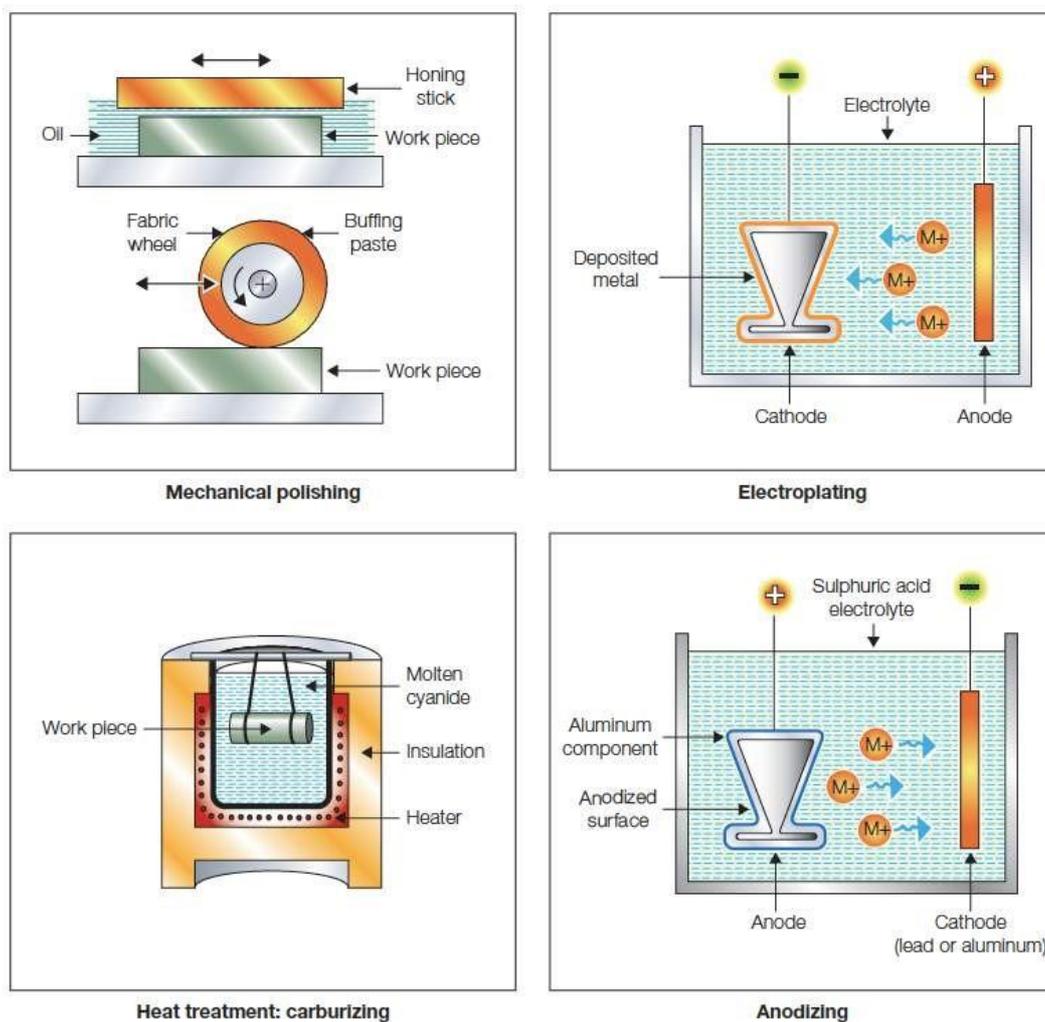


Gambar 8.12 Operasional penyambungan.

Dalam ikatan adesif, lapisan film perekat diterapkan pada satu permukaan yang kemudian ditekan ke yang lain. *Fastening* dapat dicapai dengan bolting, riveting, stapling; push-through snap fastener, atau rod-to-sheet snap fastener. Dalam pengelasan fusi logam, logam meleleh, dan dapat ditambahkan batang pengisi untuk memberikan ikatan atau pelapisan. Dalam

pengelasan polimer termoplastik, panas diterapkan pada komponen polimer, yang secara bersamaan ditekan bersama-sama untuk membentuk ikatan.

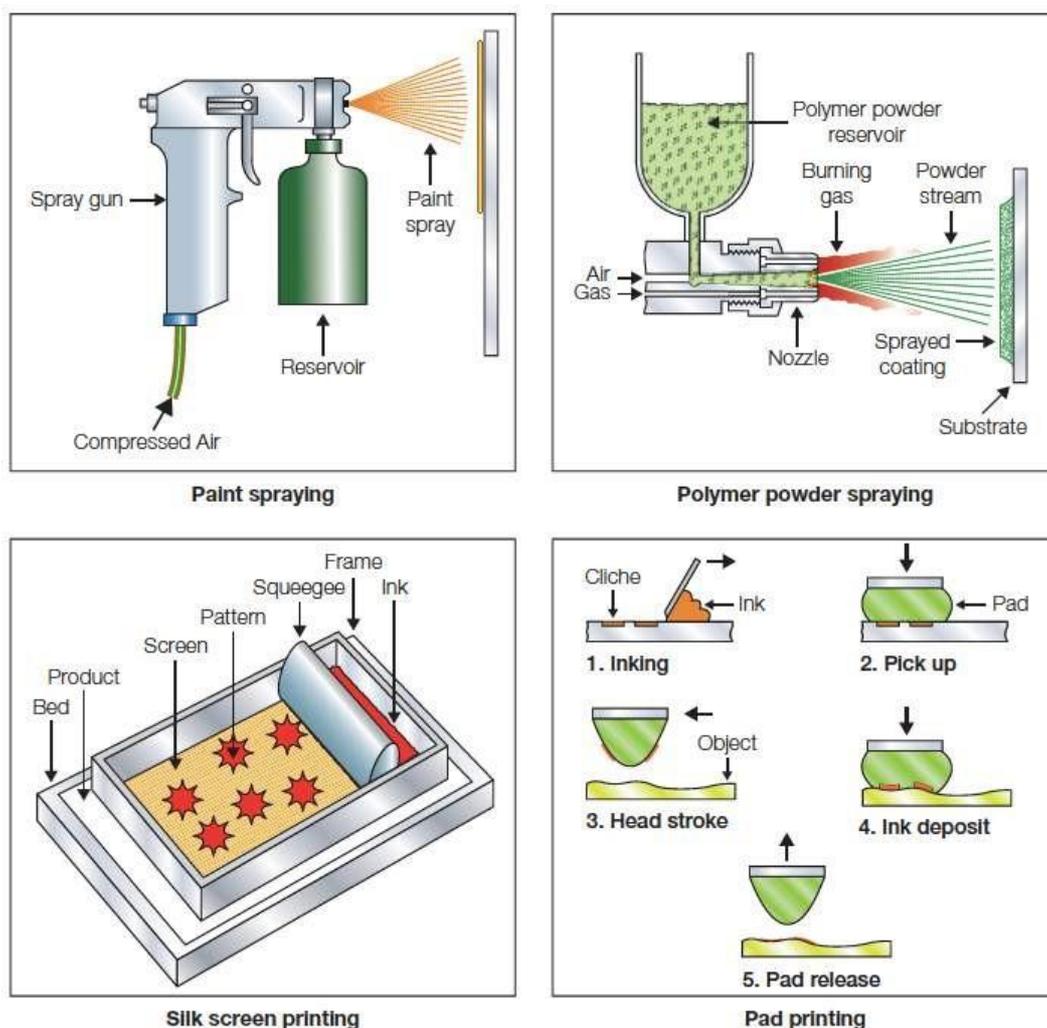
Proses Penyambungan. Gambar 8.12 menunjukkan bahwa banyak cara yang dapat dilakukan untuk menggabungkan banyak bagian. Hampir semua material dapat digabungkan dengan perekat. Sambungan ulir, riveting, stapling, dan snap fitting umumnya digunakan untuk menggabungkan polimer dan logam serta memungkinkan dibongkar jika diperlukan. Pengelasan adalah kelas terbesar dalam proses penyambungan. Secara luas digunakan untuk mengikat logam dan polimer. Pengelasan gesekan (*friction welding*) dan *friction-stir welding* mengandalkan panas dan deformasi yang dihasilkan oleh gesekan sehingga menciptakan ikatan antara logam yang berbeda. Keramik dapat diikat melalui difusi dalam dirinya sendiri, kaca, dan logam.



Gambar 8.13 Proses finishing untuk melindungi dan meningkatkan sifat material. Dalam pemolesan mekanis, kekasaran permukaan berkurang dan presisinya meningkat, pembuangan material menggunakan gerinda dengan abrasif yang halus. Dalam elektroplating, logam dilapiskan pada benda kerja dengan pengendapan elektro di bak pelapisan. Dalam perlakuan panas, lapisan permukaan benda diperkeras dan lebih tahan korosi dengan difusi karbon, nitrogen, fosfor, atau aluminium.

Jika komponen harus dilas, maka material yang akan disambung harus memiliki kemampuan las yang tinggi. Konduktifitas termal yang rendah memungkinkan pengelasan dengan tingkat input panas yang rendah, tetapi dapat menyebabkan distorsi yang lebih besar pada saat pendinginan. Ekspansi termal yang rendah memberikan regangan termal yang kecil dengan risiko distorsi yang lebih sedikit. Paduan padat lebih baik daripada paduan yang dikeraskan karena di daerah HAZ pada kedua sisi las, penebaran berlebihan dan pelunakan akan terjadi.

Pengelasan selalu meninggalkan tegangan internal yang kira-kira sama dengan kekuatan luluh dari bahan induk. Tegangan ini dapat dihilangkan dengan perlakuan panas tetapi mahal. Untuk itu dapat diminimalkan efek pengelasan dengan desain yang baik dengan cara membuat bagian yang akan dilas dibuat dengan ketebalan yang sama bila memungkinkan, lasan diletakkan pada tegangan atau defleksi yang paling kecil, dan jumlah total lasan diminimalkan.

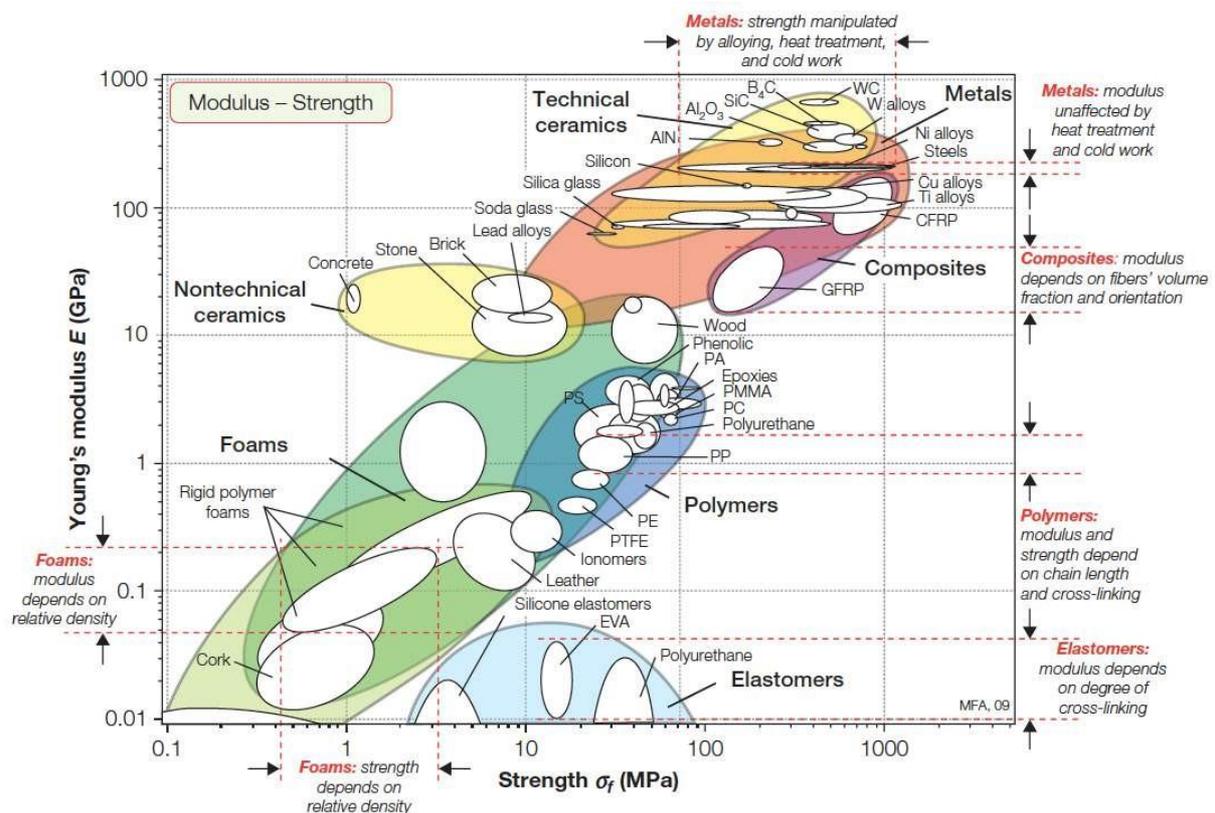


Gambar 8.14 Proses finishing untuk estetika. Cat berbasis pelarut organik memberikan lapisan tahan lama dengan hasil akhir yang tinggi, tetapi pelarut menimbulkan masalah lingkungan. Cat berbasis air lebih ramah lingkungan, tetapi lebih lambat kering dan lapisan film yang dihasilkan kurang sempurna.

Proses Finishing. Finishing meliputi perlakuan yang diterapkan pada permukaan komponen atau perakitan. Tujuan finishing adalah memperbaiki sifat mekanik dan sifat teknik lainnya, termasuk tampilannya.

Perlakuan finishing untuk meningkatkan sifat teknik (Gambar 8.13). Grinding, lapping, dan pemolesan meningkatkan kepresisian dan kehalusan, terutama untuk permukaan bantalan. Elektroplating mengendapkan lapisan logam tipis ke permukaan komponen untuk memberikan ketahanan terhadap korosi dan abrasi. Plating dan painting lebih mudah dilakukan dengan bentuk-bentuk sederhana dengan permukaan sebagian besar cembung, seperti channel, crevice, slot yang sulit dijangkau. Anodizing, phospating, dan chromating membuat lapisan tipis oksida, fosfat, atau kromat pada permukaan dan memberikan ketahanan terhadap korosi.

Perlakuan panas adalah bagian penting pemrosesan banyak material. Pengerasan paduan aluminium, titanium, dan nikel dilakukan untuk memperoleh kekuatan yang dihasilkan melalui perlakuan panas terkontrol: quenching dari suhu tinggi yang diikuti penuaan (aging) pada suhu yang lebih rendah. Kekerasan dan ketangguhan baja dikendalikan dengan cara yang sama, dengan quenching dari suhu "austenitizing" (sekitar 800⁰C) dan tempering. Perlakuan dapat diberikan ke seluruh komponen, seperti dalam karburasi massal, flame hardening, induction hardening dan laser surface hardening.



Gambar 8.15 Luasnya gelembung material pada sifat material memberikan gambaran tentang sifat mana yang dapat direkayasa dengan pemrosesan.

Quenching adalah pendinginan yang sangat cepat dan kontraksi termal tiba-tiba yang menghasilkan tegangan cukup besar yang dapat menyebabkan distorsi atau crack pada

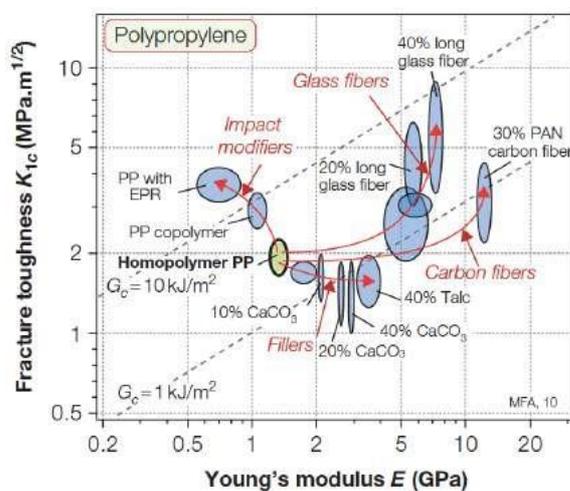
komponen, Tegangan dapat disebabkan oleh distribusi suhu yang tidak seragam karena geometri komponen. Untuk menghindari tegangan yang merusak, maka ketebalan penampang harus seragam sehingga laju quenching tidak terjadi di bawah nilai kritis yang diperlukan untuk perlakuan panas. Konsentrasi tegangan harus dihindari karena akan menjadi sumber retakan. Material yang cetak atau dideformasi akan memiliki tegangan internal yang dapat dihilangkan dengan anil atau perlakuan panas lainnya.

8.3 Pemrosesan Sifat Material

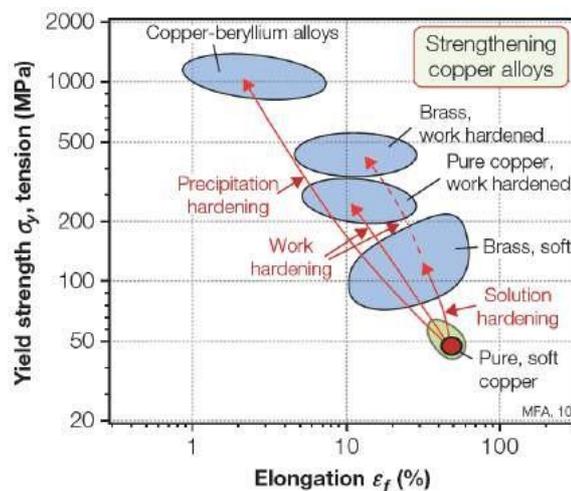
Luasnya gelembung material dalam diagram sifat memberikan gambaran tentang sifat mana yang dapat direkayasa dengan pemrosesan. Gambar 8.15 adalah grafik kekuatan-modulus, yang menggambarkan di mana kedua sifat logam dapat atau tidak dikendalikan dengan paduan, perlakuan panas, dan pekerjaan dingin.

Bentuk gelembung yang agak berbeda untuk komposit dan busa yang mencerminkan sifat-sifatnya tergantung pada kandungan serat dan orientasinya. Pada busa diukur dengan porositas atau kepadatan relatif. Modulus dan kekuatan polimer dan elastomer tergantung pada panjang rantai dan tingkat hubungan silang, aspek struktur yang secara langsung dikendalikan oleh pemrosesan. Kekuatan keramik tergantung pada porositas, mikrostruktur yang secara langsung dipengaruhi oleh pemrosesan.

Rentang kekuatan polimer sekitar 5-20 dari ketangguhan frakturnya, tergantung kimia, panjang rantai, dan tingkat hubungan silang. Perubahan yang lebih signifikan dimungkinkan dengan memadukan, mengisi, memperkuat, atau plastisisasi. Gambar 8.16 menunjukkan bagaimana pengaruh modulus E dan ketangguhan fraktur K_{IC} dari polypropylene, PP.



Gambar 8.16 Kekuatan dan ketangguhan polipropylene yang menunjukkan pengaruh filler, modifikasi impak dan serat



Gambar 8.17 Mekanisme penguatan dan penurunan keuletan pada baja paduan. Semakin tinggi kekuatannya, semakin rendah ketangguhan

Pencampuran atau kopolimerisasi dengan elastomer, seperti EPR atau EDPM dapat mengurangi modulus tetapi meningkatkan ketangguhan fraktur K_{IC} dan ketangguhan G_C . Mengisi dengan bubuk kaca, talc, atau kalsium karbonat dapat meningkatkan modulus menjadi

2X lipat, tetapi akan kehilangan ketangguhan. Plasticizing menurunkan modulus bahkan lebih dramatis. Proses ini dapat mengubah modulus polimer dengan faktor 100 dan ketangguhan dengan faktor 10.

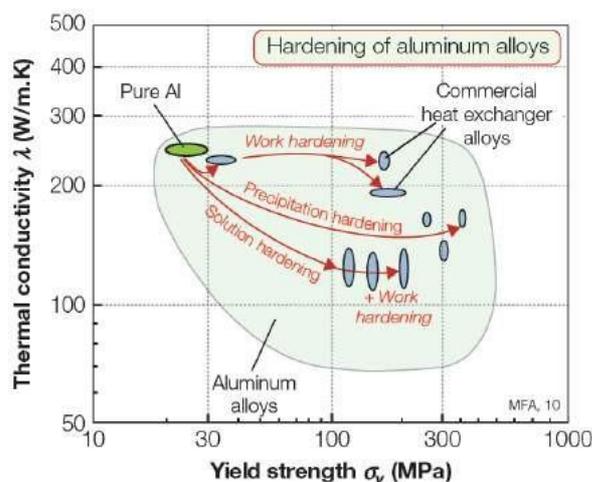
Tabel 8.1 Paduan logam pada pemakaian khusus, yang menunjukkan kekuatan dan mekanisme yang digunakan

Alloy	Typical uses	Solution hardening	Precipitate hardening	Work hardening
Pure Al	Kitchen foil	-	-	+++
Pure Cu	Wire	-	-	+++
Cast Al, Mg	Automotive part	+++	+	-
Bronze (Cu-Sn), Brass (Cu-Zn)	Marine component	+++	+	+
Non-heat-treatable wrought Al	Ship, cans, structure	+++	-	+++
Heat-treatable wrought Al	Aircraft, structure	+	+++	+
Low carbon steel	Car body, structure, ship, can	+++	-	+++
Low alloy steel	Automotive part, tool	+	+++	+
Stainless steel	Pressure vessel	+++	+	+++
Cast Ni alloy	Jet engine turbine	+++	+++	-

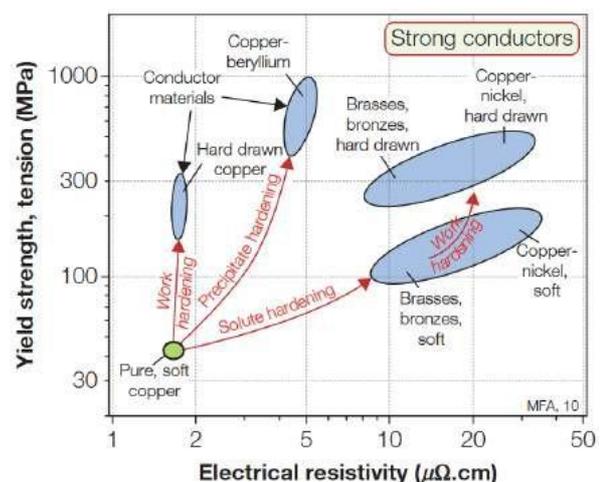
+++ = sering digunakan, + = kadang-kadang digunakan

Tabel 8.1 mencantumkan beberapa aplikasi perlakuan panas. Solution hardening, precipitation hardening, and work hardening dipadukan untuk memperoleh kombinasi kekuatan dan ketangguhan yang diinginkan.

Gambar 8.17 menggambarkan peluang memperoleh kekuatan paduan tembaga. Untuk meningkatkan kekuatan adalah menghilangkan keuletannya yang diukur dengan pemanjangan terhadap fraktur ϵ_f . Kekuatan dan keuletan adalah sifat sensitif struktur yang tergantung pada komposisi dan mikrostruktur yang dapat dikendalikan oleh pemrosesan. Kekerasan, kekuatan lelah, ketangguhan fraktur, dan konduktivitas termal dan listrik adalah sifat sensitif struktur. Kombinasi sifat tertentu diilustrasikan Gambar 8.16 dan 8.17. Material untuk perpindahan panas membutuhkan konduktivitas termal yang baik dengan kekuatan tinggi.



Gambar 8.18 Konduktivitas thermal dan kekuatan paduan aluminium



Gambar 8.19 Material untuk kabel dengan kekuatan tinggi dan rendah resistifitas

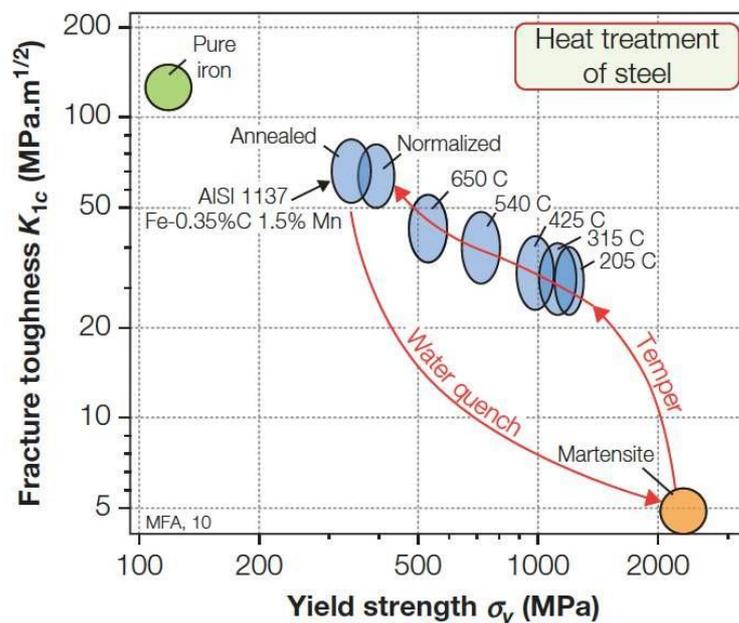
Gambar 8.18 menunjukkan bagaimana pemrosesan mengubah kedua sifat ini untuk paduan berbasis aluminium yang diperkeras, masing-masing melalui tiga mekanisme utama: *solid solution*, *work hardening*, dan *precipitation hardening*. *Work hardening* dapat memperkuat secara signifikan tanpa mengubah konduktivitasnya, sementara *solid solution* dan *precipitation hardening* memberikan penurunan konduktivitas. Banyak aplikasi listrik, seperti motor berkecepatan tinggi dan transmisi daya memerlukan material dengan konduktivitas yang baik dan kekuatan tinggi.

Gambar 8.19 menggambarkan konduktor tembaga. Dengan menambahkan solute maka dapat meningkatkan kekuatan dan resistivitas listriknya. Dislokasi menambah kekuatan.

Precipitates meningkatkan kekuatan dengan hanya sedikit kehilangan konduktivitasnya. *Precipitation hardening* dan *work hardening* adalah cara terbaik untuk memperkuat konduktor.

Tidak ada pengolahan sifat material yang lebih baik dari perlakuan panas pada baja. Gambar 8.20 menunjukkan urutan untuk baja karbon sedang. Baja ini disamakan (dipanaskan ke austenit FCC) untuk melarutkan semua karbon yang kemudian di-quenching dalam air atau minyak yang menyebabkannya perubahan menjadi martensite yang keras dan rapuh. Martensite memiliki kekerasan tinggi tetapi sangat rapuh, ketangguhan frakturnya sangat rendah sehingga tidak cocok sebagai bahan struktural. Tempering mengurangi kekerasan dan menghasilkan kekuatan tetapi mengembalikan ketangguhan ke tingkat yang tergantung pada suhu dan waktu yang tempering.

Dengan demikian pemrosesan memainkan peran sentral dalam merekayasa sifat material. Proses dipilih karena kemampuannya untuk membangun bentuk dan sifat material.



Gambar 8.20 Perubahan ketangguhan patah dan kekuatan luluh untuk baja karbon sedang pada perlakuan panas.

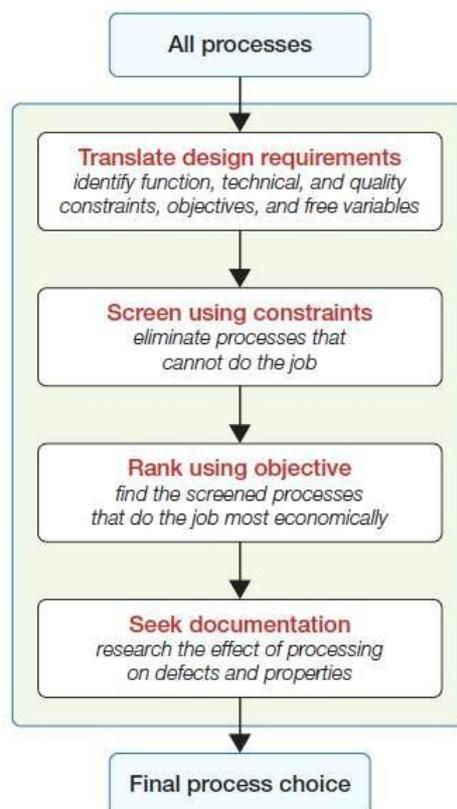
8.4 Sistematika Pemilihan Proses

Strategi pemilihan proses sama dengan pemilihan material. Gambar 8.21 mencantumkan langkah-langkah pemilihan proses: translasi, penyaringan, peringkat, dan dokumentasi.

Translasi. Fungsi komponen menentukan pilihan awal material dan bentuk. Pilihan ini memberikan batasan pada pemilihan proses. Dua jenis batasan adalah: **teknis**, dapatkah proses melakukan pekerjaan itu semua? Dan **kualitas**, bisakah itu melakukannya dengan cukup baik? Satu batasan teknis selalu ada: kompatibilitas material dan proses. Kendala kualitas meliputi kepresisian, permukaan akhir, dan profil sifat yang diinginkan sambil menghindari cacat. Tujuan umum pemrosesan adalah meminimalkan biaya. Variabel bebas sebagian besar terbatas untuk memilih proses itu sendiri dan parameter operasinya (suhu, laju aliran, dan sebagainya). Tabel 8.2 meringkas hasil tahap terjemahan.

Tabel 8.2 Translation of process requirement	
Function	What must the process do? Shape? Join? Finish?
Constraint	What technical limits must be met? Material and shape compatibility. What quality limits must be met? Precision, avoidance defect.
Objective	What is to be maximized or minimized? Cost? Time? Quality?
Free variable	Choice of process and process-operating conditions

Penyaringan. Langkah penyaringan dengan menerapkan batasan, menghilangkan proses yang tidak dapat memenuhinya. Beberapa atribut proses adalah rentang numerik sederhana seperti ukuran atau massa komponen yang dapat ditangani proses, kepresisian, atau kehalusan permukaan yang dapat dicapainya. Daftar material yang prosesnya dapat dilakukan. Persyaratan seperti "terbuat dari magnesium dan berat sekitar 3 kg" mudah dibandingkan untuk menghilangkan proses yang tidak dapat membentuk magnesium atau tidak dapat menangani komponen sebesar 3 kg.



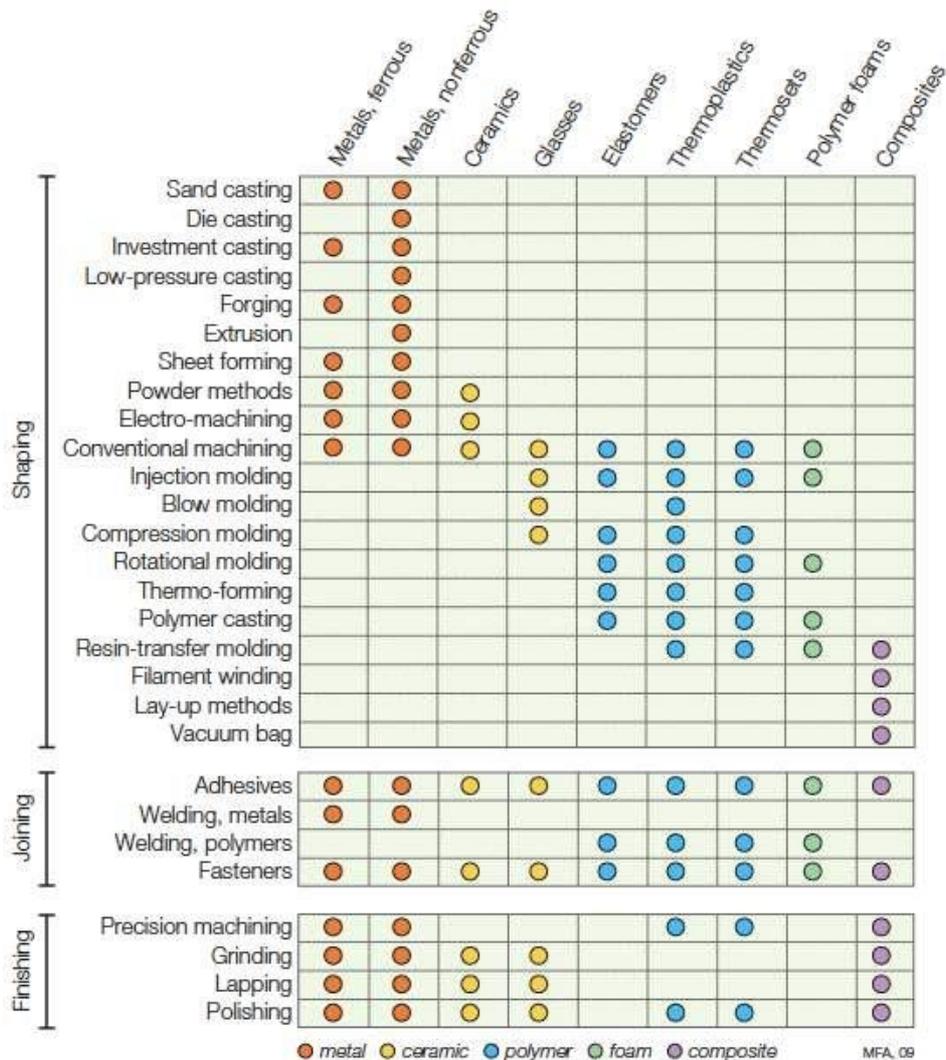
Gambar 13.21 Flowchart prosedur pemilihan proses

Peringkat. Peringkat didasarkan pada satu atau lebih tujuan, yang paling jelas adalah meminimalkan biaya. Dalam aplikasi tertentu menuntut memaksimalkan kualitas terlepas dari biaya, meskipun lebih biasanya itu adalah trade-off antara keduanya yang dicari.

Dokumentasi. Penyaringan dan pemeringkatan tidak mengatasi masalah kualitas dan produktivitas. Proses yang paling baik dieksplorasi melalui pencarian dokumentasi, seperti pedoman desain, panduan praktik terbaik, studi kasus, dan analisis kegagalan. Keahlian teknis yang paling penting berkaitan dengan produktivitas dan kualitas. Semua jenis peralatan pemrosesan memiliki rentang kondisi operasi yang optimal di mana proses bekerja paling baik dan menghasilkan produk dengan kualitas tanpa kompromi. Kegagalan operasional dapat menyebabkan cacat manufaktur seperti porositas berlebihan, retak, atau tegangan sisa. Kondisi ini dapat menyebabkan turunnya produktivitas dan dapat menyebabkan kegagalan dini.

Menerapkan strategi

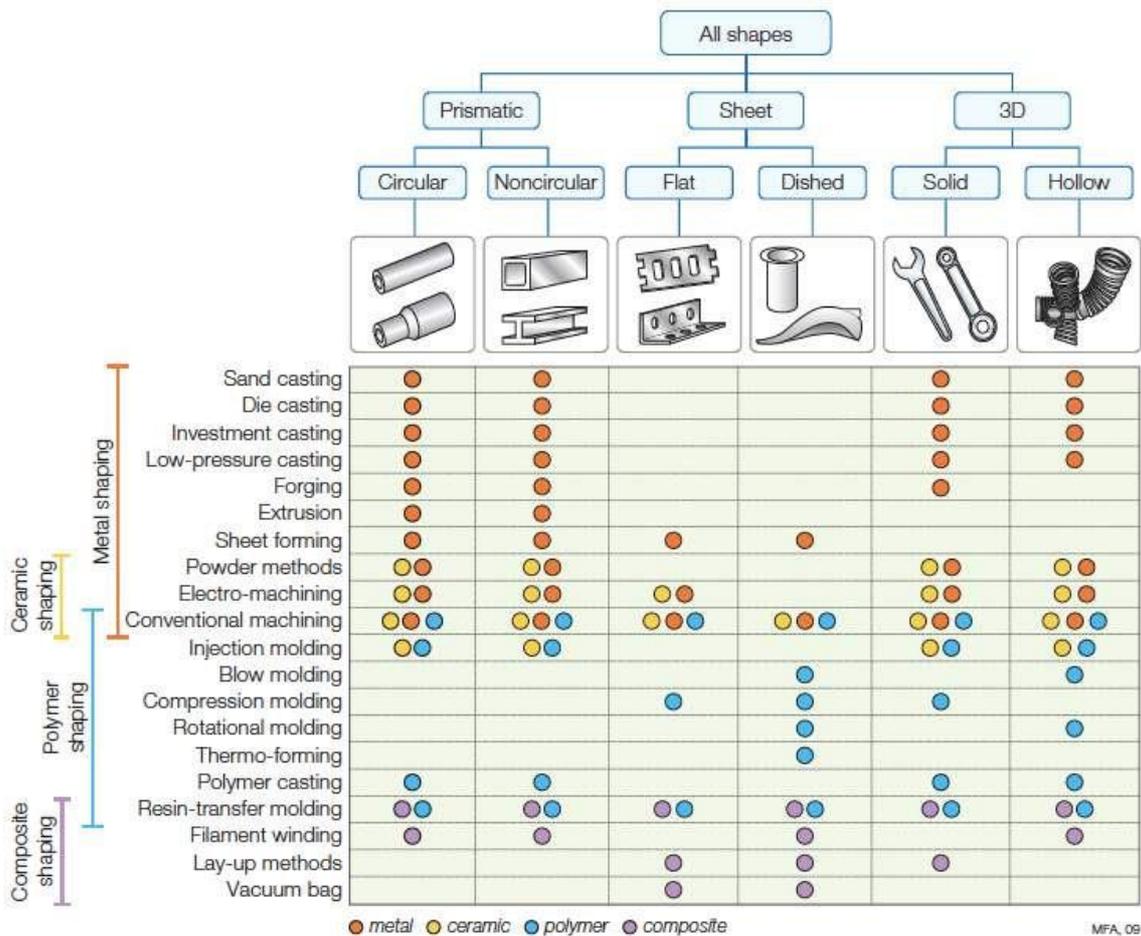
Ini ditampilkan dengan mudah sebagai matriks sederhana dan bagan batang. Matriks ini menyediakan alat seleksi yang dibutuhkan untuk penyaringan.



Gambar 8.22 Matriks proses-material

Kompatibilitas Material-Proses. Gambar 8.22 menunjukkan matriks kompatibilitas material-proses. Proses pembentukan berada di bagian atas, dengan kombinasi yang kompatibel ditandai dengan titik-titik berwarna yang mengidentifikasi keluarga material. Penggunaannya untuk penyaringan sangat mudah: Tentukan materi dan baca proses atau sebaliknya, tentukan proses dan baca materi. Penyebaran diagonal titik-titik dalam matriks mengungkapkan bahwa setiap kelas material memiliki serangkaian rute prosesnya sendiri. Permesinan kompatibel dengan hampir semua keluarga material. Proses menyambung dengan menggunakan perekat dan pengencang dapat digunakan untuk sebagian besar material. Proses finishing digunakan untuk material yang lebih keras, terutama logam. Polimer dicetak untuk membentuk dan memperlakukan lebih lanjut untuk tujuan dekoratif.

Kompatibilitas Proses-Bentuk. Bentuk adalah atribut yang paling sulit untuk dicirikan. Banyak proses melibatkan gerak rotasi atau translasi pada peralatan atau material yang mengarahkan cara berpikir terhadap simetri axial, simetri translasi, dan keseragaman penampang. Membubut adalah membuat bentuk lingkaran. Ekstrusi, drawing, dan rolling membuat bentuk prismatik, baik melingkar maupun noncircular. Proses pembentukan lembaran membuat bentuk datar atau bentuk piring. Proses tertentu dapat membuat bentuk tiga dimensi, dan di antaranya dapat membuat bentuk berongga.

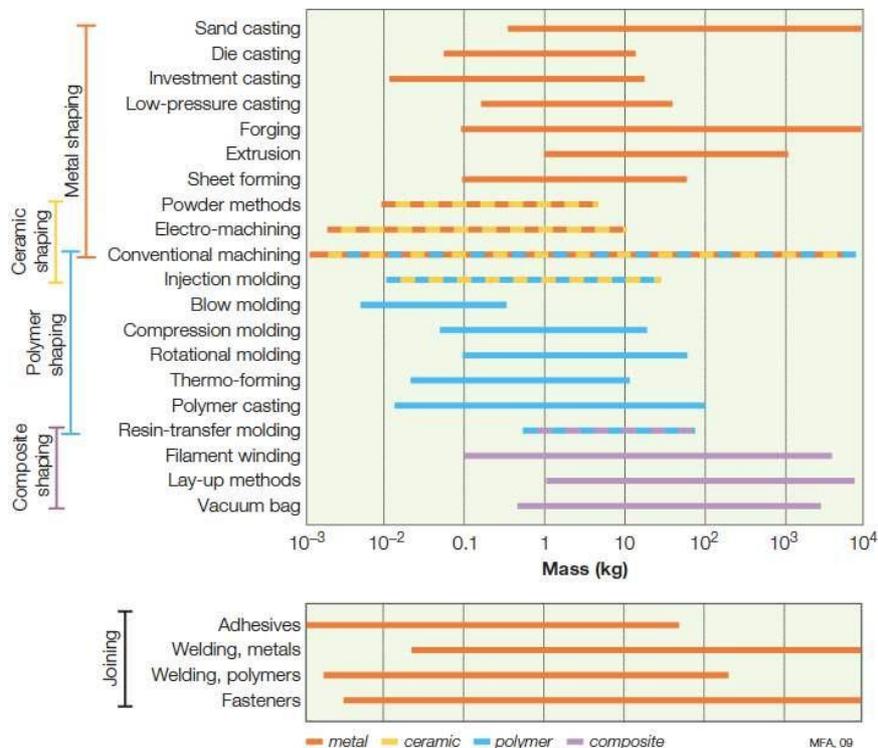


Gambar 8.23 Matriks proses-bentuk. Informasi kompatibilitas material disertakan pada paling kiri

Gambar 8.23 menggambarkan skema klasifikasi ini. Bentuk prismatic yang ditampilkan di sebelah kiri, dibuat dengan rolling, ekstrusi, atau drawing memiliki fitur khusus. Proses ini memungkinkan pembuatan dengan panjang terus menerus. Proses berkelanjutan (*continuous process*) sangat cocok untuk produk prismatic yang panjang seperti jalur kereta api, tabung, pelat dan lembaran. Roll silinder menghasilkan lembaran. Roll dengan bentuk profil yang lebih kompleks, seperti rel kereta api. Ekstrusi adalah proses kontinu yang sangat berguna, karena profil prismatic kompleks yang meliputi saluran internal dan fitur longitudinal seperti tulang rusuk dan stiffener dapat diproduksi dalam satu langkah.

Matriks proses-bentuk menampilkan relasi di antara keduanya. Jika proses tidak dapat membuat bentuk yang diinginkan, maka untuk menggabungkannya diperlukan proses sekunder yang menambahkan fitur tambahan, seperti pengecoran yang diikuti dengan proses pemesinan. Setiap proses tambahan akan menambah biaya.

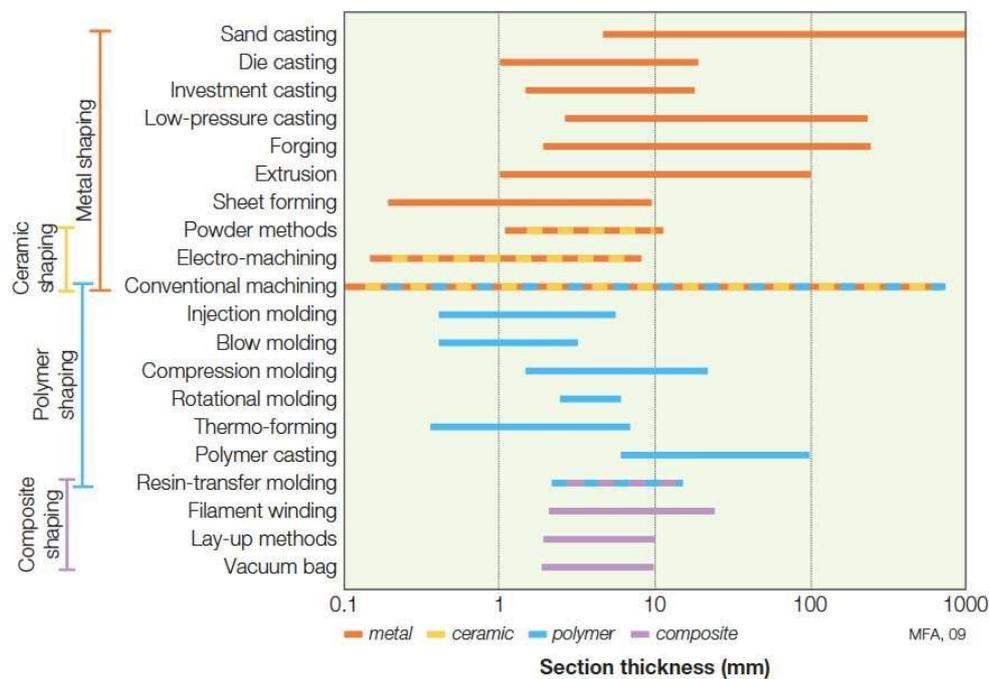
Proses Pembentukan: Massa dan Ketebalan Penampang. Ada batasan ukuran komponen yang dapat dibuat pada proses tertentu. Gambar 8.24 menunjukkan batasan itu. Pengkodean warna untuk kompatibilitas material menggunakan lebih dari satu warna ketika suatu proses dapat berlaku pada lebih dari satu keluarga material. Ukuran dapat ditentukan berdasarkan volume atau massa. Kecepatan mencakup faktor sekitar 50, sedangkan sebagian besar proses mencakup kisaran massa sekitar faktor 1000 atau lebih. Perhatikan bahwa atribut ini paling membedakan. Sebagian besar komponen berada dalam kisaran 0,1 hingga 10 kg yang hampir semua proses akan bekerja.



Gambar 8.24 Diagram proses-massa, termasuk penyambungan yang memungkinkan eksplorasi rantai proses yang sederhana

Setiap batang mencakup rentang ukuran yang prosesnya mampu dilakukan tanpa kesulitan teknis. Semua dapat direntangkan ke sisi yang lebih kecil atau lebih besar tetapi dengan biaya tambahan. Selama penyaringan (*screening*), penting untuk mengenali proses yang sedikit mengalami kegagalan maka dapat kembali digunakan. Gambar 8.25 memperlihatkan bagan batang kedua: bahwa untuk rentang ketebalan penampang di mana proses pembentukan dapat dilakukan.

Batas Fisik untuk Ukuran dan Ketebalan Bagian. Casting dan cetakan keduanya mengandalkan aliran material dalam keadaan cair atau semiliquid. Batas bawah pada ketebalan penampang diberlakukan oleh fisika aliran. Viskositas dan tegangan permukaan melawan aliran yang melalui saluran sempit. Kehilangan panas pada luas permukaan yang besar tetapi tipis akan mendinginkan material yang mengalir sehingga meningkatkan viskositas sebelum saluran terisi (Gambar 8.26).

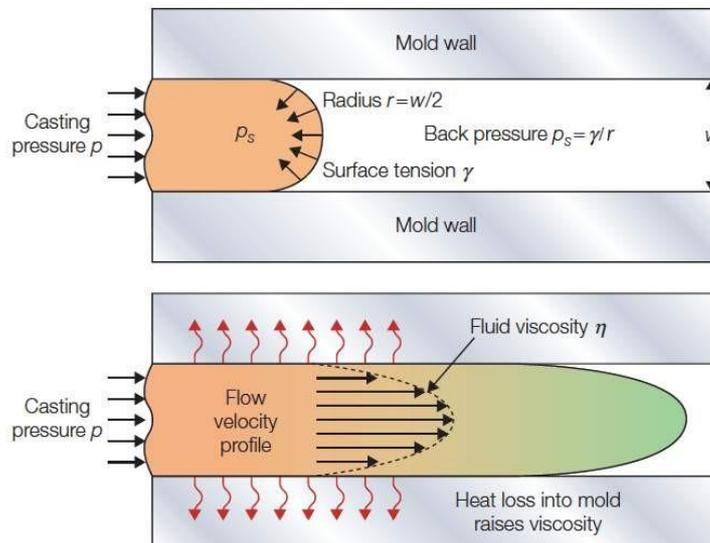


Gambar 8.25 Diagram proses-ketebalan penampang

Logam murni membeku pada suhu tertentu meningkatkan viskositas, tetapi untuk solidifikasi paduan terjadi pada berbagai suhu, yang dikenal sebagai "zona lembek," di mana paduan adalah bagian dari cairan, sebagian padat. Lebar zona ini dapat bervariasi dari beberapa derajat celcius hingga ratusan sehingga aliran logam dalam coran tergantung pada komposisi paduan. Metode pengecoran tekanan tinggi dan metode cetakan memungkinkan penampang yang lebih tipis untuk dibuat, tetapi biaya peralatan lebih banyak dan aliran yang lebih cepat dan lebih turbulen dapat menjebak banyak porositas dan menyebabkan kerusakan pada cetakan.

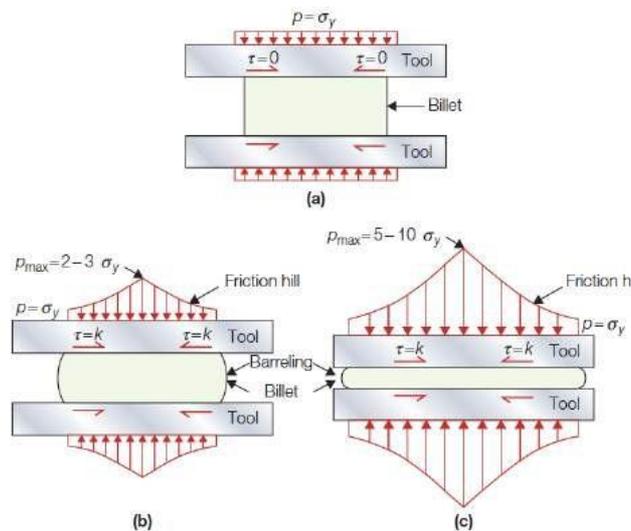
Batas atas ukuran dan penampang dalam pengecoran dan cetakan ditentukan berdasarkan penyusutannya. Lapisan luar pengecoran atau cetakan akan mendingin dan membeku terlebih dulu dan menyebabkan bagian kulit yang kaku. Ketika interior membeku, perubahan volume

dapat mendistorsi produk atau retakan pada kulit, atau menyebabkan kavitas internal. Masalah semacam ini paling banyak terjadi pada perubahan penampang, karena batasan memperkenalkan tekanan tarik yang menyebabkan robekan panas, retakan disebabkan oleh kontraksi termal yang terkendala. Komposisi yang berbeda memiliki kerentanan yang berbeda terhadap hot tearing.



Gambar 8.26 Aliran logam cair atau polimer ke penampang tipis ditahan oleh tegangan permukaan seperti pada (a) dan oleh kekuatan kental (b) kehilangan panas ke dalam cetakan meningkatkan viskositas dan dapat menyebabkan solidifikasi dini.

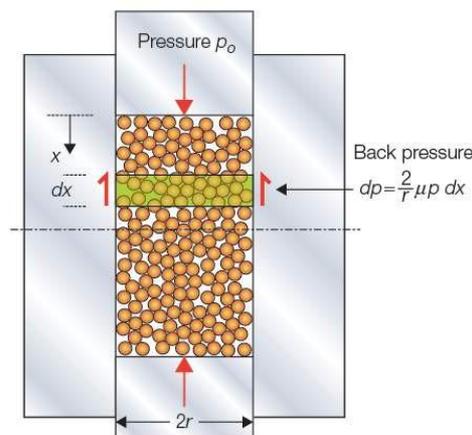
Pembentukan logam dengan deformasi, roll panas atau dingin, penempaan, atau ekstrusi juga melibatkan aliran. Ketipisan yang dapat ditempa, di-roll, atau diekstrusi dibatasi oleh aliran plastis. Semakin tipis penampang, semakin besar tekanan roll atau gaya forging yang diperlukan.



Gambar 8.27 Pengaruh gesekan dan rasio aspek pada forging: (a) kompresi uniaxial dengan gesekan yang sangat rendah; (b) dengan gesekan menempel tekanan kontak naik di puncak gesekan; (c) semakin besar rasio aspek, semakin besar kenaikan tekanan, pada akhirnya membatasi ketipisan yang dapat dicapai.

Gambar 8.27 menunjukkan bahwa gesekan dapat mengubah distribusi tekanan pada cetakan dan di bawah roll. Pelumasan yang baik, seperti (a) pembebanan uniaksial dan material mengalir pada tegangan luluhnya σ_y . Dengan gesekan, seperti (b) logam bergeser pada antarmuka cetakan dan tekanan melandai karena gesekan menahan penyebaran lateral, yang memberikan "friction hill". Luasan di bawah distribusi tekanan adalah total beban pembentukan, sehingga gesekan meningkatkan beban. Semakin besar rasio aspek penampang (lebar/ketebalan), semakin tinggi tekanan maksimum yang diperlukan untuk menyebabkan peluluhan seperti pada (c).

Gesekan membatasi rasio aspek dalam proses bubuk. Tekanan yang bekerja berkurang karena gesekan cetakan-dinding (Gambar 8.28) dengan hasil bahwa jika rasio aspek terlalu besar, maka tekanan tidak memadai untuk mengkompaksi bubuk di tengah produk.



Gambar 8.28 Rasio aspek tinggi-lebar dalam tempa bubuk dibatasi oleh gesekan cetakan-dinding yang menyebabkan tekanan pepadatan turun secara eksponensial dengan jarak dari permukaan.

Toleransi dan Kekasaran. Aspek kualitas produk ditentukan oleh kepresisian dan permukaan akhirnya. Aspek ini diukur dengan toleransi dan kekasaran permukaan R. Ketika dimensi komponen ditentukan maka kualitas permukaan juga ditentukan, meskipun tidak harus di seluruh permukaan.

Tabel 8.3 Tingkatan finishing		
Finish, μm	Process	Typical Application
R = 0.01	Lapping	Mirror
R = 0.1	Precision grind or lap	High-quality bearing
R = 0.2-0.5	Precision grinding	Cylinder, piston, cam, bearing
R = 0.5-2	Precision machining	Gear, ordinary machine part
R = 2-10	Machining	Light-loaded bearing, noncritical component
R = 3-100	Unfinish casting	Nonbearing surface

Kualitas permukaan sangat penting untuk menghubungkan permukaan seperti permukaan flens yang harus menumpuk untuk membentuk segel atau peluncur yang berjalan dalam alur. Toleransi T pada dimensi y ditentukan sebagai:

$$y = 100 \pm 0.1 \text{ mm}$$

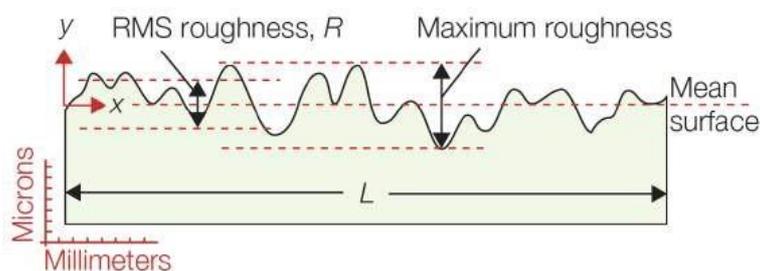
atau

$$y = 50_{-0.001}^{+0.01} \text{ mm}$$

yang menunjukkan bahwa ada lebih banyak kebebasan untuk ukuran besar daripada ukuran kecil. Kekasaran permukaan ditentukan sebagai batas atas, $R < 100 \mu\text{m}$. Finishing permukaan diperlukan untuk berbagai produk ditunjukkan dalam Tabel 8.3. Tabel ini juga menunjukkan proses umum yang dapat mencapai tingkat penyelesaian ini. Kekasaran permukaan adalah ukuran penyimpangan permukaan (Gambar 8.29). Ini didefinisikan sebagai amplitudo root-mean-square (RMS) dari profil permukaan (Persamaan 13.1):

$$R^2 = \frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx$$

Salah satu cara untuk mengukurnya adalah dengan menyeret stylus yang ringan dan tajam ke permukaan dalam arah x sambil merekam profil vertikal $y(x)$, seperti memutar rekaman gramophone. Profilometri optik, yang lebih cepat dan lebih akurat, menggunakan interferometri laser untuk memetakan ketidakteraturan permukaan. Toleransi T jelas lebih besar dari 2R karena R adalah *root-mean-square roughness*, kekasaran puncak, dan batas bawah mutlak untuk toleransi, lebih seperti 5R. Proses nyata memberikan toleransi yang berkisar dari 10R hingga 1000R.



Gambar 8.29 Bagian melalui permukaan yang menunjukkan permukaannya yang tidak teratur (diboleh-lebihkan secara artistik ke arah vertikal). Ketidakteraturan diukur oleh keseradatan RMS R.

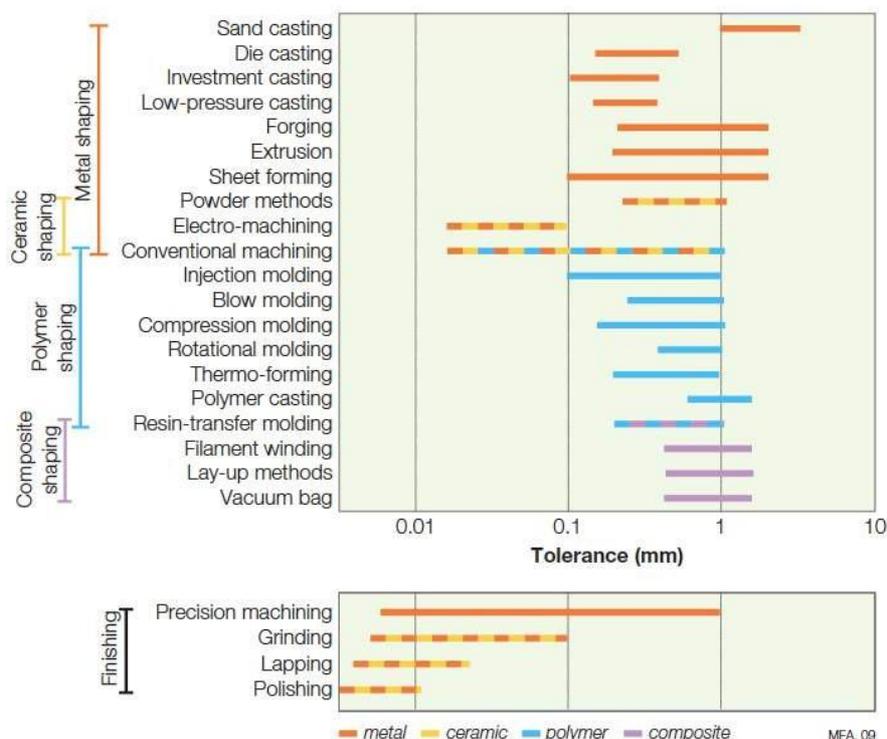
Gambar 8.30 dan 8.31 menunjukkan rentang karakteristik toleransi dan kekasaran yang dapat diproses, mempertahankan pengkodean warna untuk keluarga material. Data untuk proses penyelesaian ditambahkan di bawah proses pembentukan. Pengecoran pasir memberikan permukaan yang kasar. Pengecoran ke dalam cetakan logam memberikan permukaan yang lebih halus. Tidak ada proses pembentukan untuk logam, lakukan lebih baik daripada $T = 0.1 \text{ mm}$ dan $R = 0.5 \mu\text{m}$.

Pemesinan, yang memiliki akurasi dimensi dan finishing permukaan yang tinggi, biasanya digunakan setelah pengecoran atau pemrosesan deformasi agar toleransi atau finishing sesuai yang diinginkan, menciptakan rantai proses. Permukaan logam dan keramik dapat digrinding serta dilapisi dengan presisi dan kehalusan yang tinggi. Reflektor teleskop besar memiliki

toleransi mendekati 5 μm dan kekasaran sekitar 1/100. Biaya proses meningkat secara eksponensial karena persyaratan untuk keduanya dibuat lebih ketat.

Polimer yang dicetak meninggalkan finishing cetakan yang sangat halus. Pemesinan untuk meningkatkan finishing. Toleransi yang lebih baik dari ± 0.2 mm jarang digunakan karena tekanan internal yang ditinggalkan oleh cetakan menyebabkan distorsi dan polimer mengalami creep.

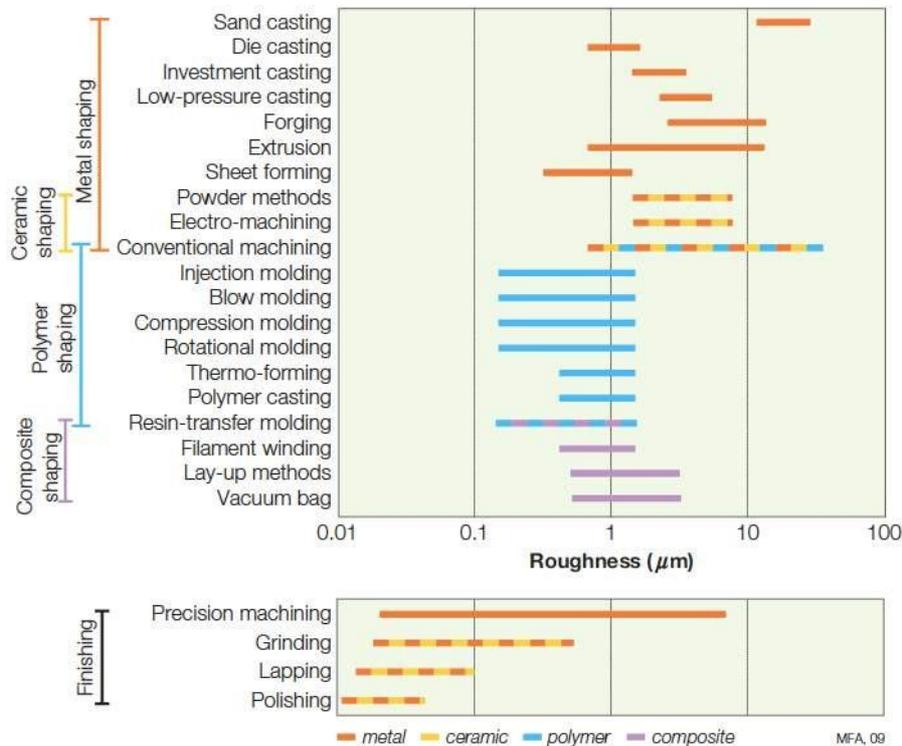
Penyambungan: Kompatibilitas Material. Proses untuk menggabungkan logam, polimer, keramik, dan kaca yang berbeda. Perakat hanya cocok untuk mengikat beberapa material. Metode pengelasan untuk polimer tentu berbeda dengan pengelasan logam. Keramik tidak dapat dilas atau digabungkan secara ikatan difusi. Matriks proses-materi (Gambar 8.22) mencakup empat kelas proses penyambungan.



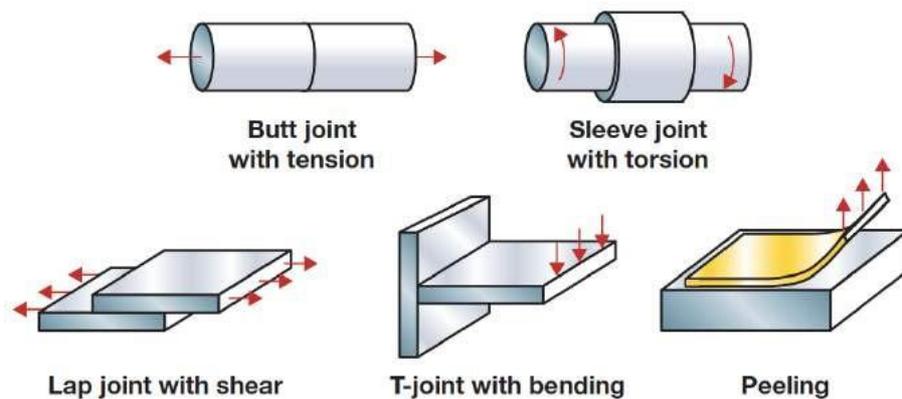
Gambar 8.30 Diagram proses-toleransi. Inklusi pada proses finishing memungkinkan rantai proses yang simple untuk digali

Ketika sambungan berada di antara material yang berbeda, prosesnya harus kompatibel dengan keduanya. Perakat dan pengencang memungkinkan sambungan di antara material yang berbeda dimana proses pengelasan tidak dapat dilakukan. Jika logam yang berbeda bergabung berada dalam kontak listrik, maka akan timbul korosi muncul jika sambungannya basah. Hal ini dapat dihindari dengan memasukkan lapisan isolasi di antara kedua permukaannya. Ketidaksamaan ekspansi termal memberikan tegangan internal pada sambungan jika suhu berubah, dengan risiko distorsi atau kerusakan. Mengidentifikasi praktik yang baik dalam penyambungan material yang berbeda adalah bagian dari langkah dokumentasi.

Geometri dan Mode Pembebanan Sambungan. Geometri sendi dan cara pembebanan (Gambar 8.32) mempengaruhi pilihan proses. Perkat sendi mendukung gaya geser tetapi buruk dalam mengupas. Perkat membutuhkan area kerja yang luas. Kinerja lap joint bagus, tetapi butt joint tidak. Paku keling dan staples sangat bagus untuk pembebanan geser tetapi kurang baik dalam tension. Las dan pengencang berulir lebih mudah digunakan tetapi mencocokkan pilihan proses dengan geometri dan pemuatan adalah penting.



Gambar 8.31 Diagram proses-kekasaran permukaan. Inklusi pada proses finishing memungkinkan rantai proses sederhana dapat dieksplorasi.



Gambar 8.32 Geometri dan mode pembebanan sambungan

Fungsi Sekunder Sambungan. Sambungan dapat berfungsi sebagai segel, dan diperlukan untuk mengecualikan gas atau cairan. Hal ini diperlukan untuk menghantarkan atau mengisolasi terhadap konduksi panas atau listrik, atau untuk operasi suhu tinggi. Penggunaan

sambungan dapat bersifat permanen atau dapat dibongkar pasang pada akhir umur pakai produk untuk daur ulang dan digunakan kembali: pengikat berulir dan lem.

Perawatan Permukaan: Kompatibilitas Material. Kompatibilitas proses material untuk perlakuan permukaan ditunjukkan di bagian bawah matriks pada Gambar 8.22. Finishing permukaan lebih penting untuk logam daripada untuk polimer.

Tujuan Perlakuan Permukaan. Semua perlakuan permukaan menambah biaya, tetapi nilai tambah yang diperoleh juga besar. Tabel 8.4 menggambarkan keragaman fungsi perlakuan permukaan, yaitu: melindungi, meningkatkan kinerja, dan estetika. Melindungi permukaan komponen dapat memperpanjang umur pakai produk dan meningkatkan interval antara siklus pemeliharaan. Pelapisan pada alat potong memungkinkan kecepatan pemotongan yang lebih tinggi dan produktifitas yang lebih besar. Proses pengerasan permukaan memungkinkan paduan lapisan substrat dapat diganti dengan bahan yang lebih murah, misalnya baja karbon menengah diganti dengan permukaan karburasi keras atau lapisan nitrida titanium keras (TiN).

Tabel 8.4 Fungsi yang disediakan oleh perlakuan permukaan	
Corrosion protection, aqueous environments	Thermal insulation
Corrosion protection, gas environments	Electrical insulation
Wear resistance	Magnetic response
Friction control	Decoration
Fatigue resistance	Color
Thermal conduction	Reflectivity

Kompatibilitas Sekunder. Perlakuan permukaan anodizing tidak menyebabkan perubahan dimensi, presisi, dan kekasaran permukaan. Sedangkan pelapisan elektrik dan vapor deposition akan sedikit mengubah dimensi, tetapi masih meninggalkan permukaan yang sangat halus. Pelapisan bubuk polimer membentuk lapisan yang relatif tebal dan halus, seperti pengelasan yang akan menghasilkan lapisan tebal dengan permukaan kasar sehingga dibutuhkan pengerjaan akhir. Proses pengendapan "*line-of-sight*" hanya melapisi permukaan yang diinginkan dan meninggalkan luasan yang tidak dilapisi dapat dilihat. Banyak proses perlakuan permukaan yang membutuhkan panas. Proses ini hanya digunakan untuk material yang dapat mentolerir kenaikan suhu. Beberapa cat dilakukan dalam keadaan dingin, tetapi ada pula yang memerlukan pemanasan hingga 150⁰C. Perlakuan panas seperti karburising atau nitriding untuk memberikan lapisan permukaan yang keras membutuhkan panas hingga 800⁰C yang dapat mengubah struktur mikro bahan yang dilapisi.

8.5 Pemeringkatan: Biaya Proses

Bagian dari biaya adalah material untuk komponen, sisanya adalah biaya manufakturnya mulai dari proses pembentukan, asembling dan finishing. Terdapat 4 variabel yang harus diperhatikan oleh insinyur desain dalam meminimalkan biaya, yaitu:

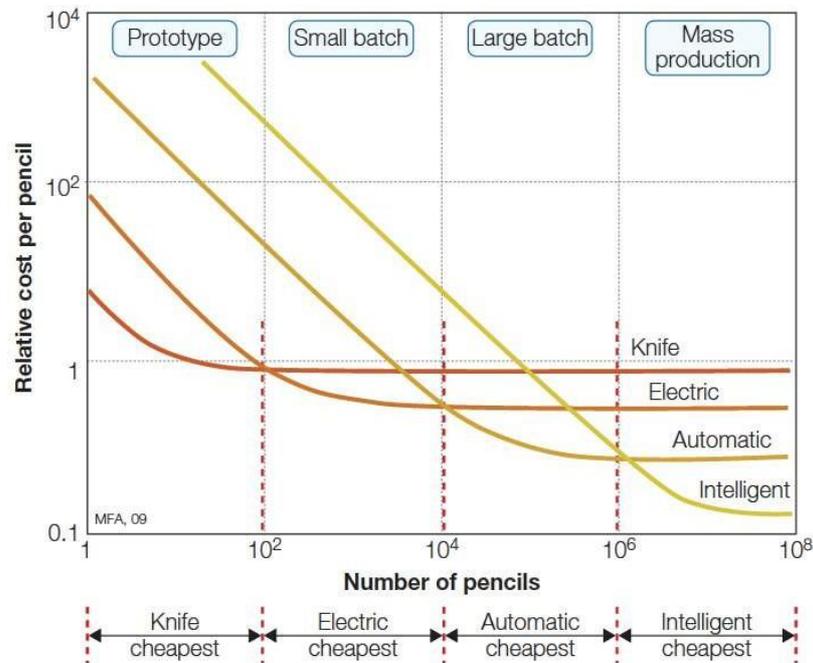
1. Menjaga standar barang. Pembelian atas sebuah produk biasanya akan lebih murah daripada biaya pembuatan produk itu sendiri. Untuk itu rancangan sebaiknya

menyesuaikan dengan standar yang ada (lembaran, batang, tabung) daripada bentuk nonstandar atau dari pengecoran atau penempaan khusus. Penggunaan material standar akan mengurangi biaya persediaan dan peralatan manufaktur yang dibutuhkan, dan dapat membantu daur ulang.

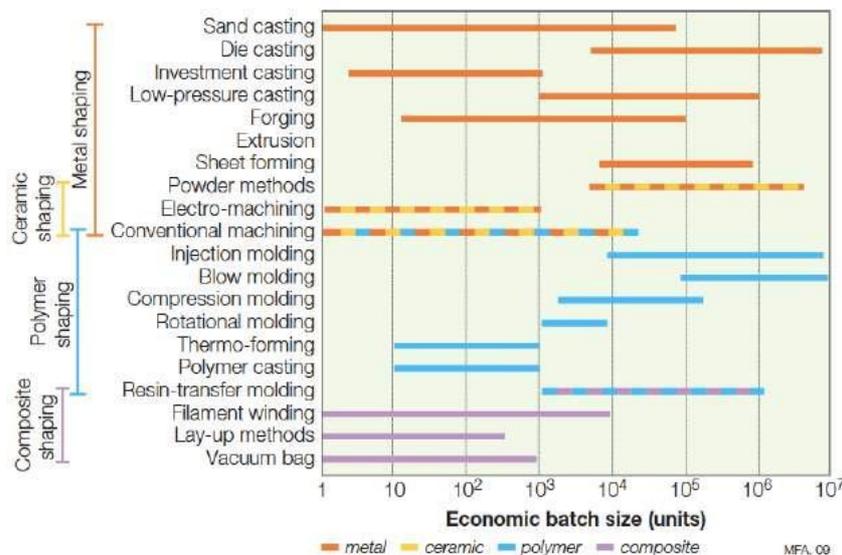
2. Menjaga hal-hal yang sederhana. Jika komponen harus dikerjakan pada mesin, maka harus dapat dijepit. Biaya akan meningkat seiring dengan berapa kali harus di-jig ulang atau direorientasi, terutama jika alat khusus diperlukan. Jika komponen harus dilas atau disolder, tukang las harus dapat menjangkaunya dengan torch-nya dan masih melihat apa yang dilakukannya. Jika harus di-cor, dicetak atau ditempa harus diingat bahwa tekanan tinggi diperlukan untuk membuat cairan mengalir ke saluran sempit. Perlu dipikirkan apakah harus membuat komponen sendiri: apakah akan aneh? Dapatkah desain ulang akan sedikit aneh?
3. Membuat komponen agar mudah untuk dirakit. Proses assembling membutuhkan waktu, dan waktu adalah uang. Jika tarif overhead hanya \$60 per jam, setiap menit waktu assembling membutuhkan tambahan biaya \$1. Desain untuk perakitan (DFA) dapat mengatasi masalah ini dengan serangkaian kriteria dan aturan. Secara singkat, ada tiga:
 - a. Minimalkan jumlah komponen.
 - b. Desain komponen untuk self-aligning pada assembling.
 - c. Gunakan metode assembling yang cepat, snap fit dan spot weld lebih cepat daripada pengikat berulir atau, perekat.
4. Tidak menentukan kinerja lebih dari yang diperlukan. Kinerja logam berkekuatan tinggi harus dibayar lebih tinggi dengan paduan dan terdapat tambahan biaya. Polimer berkinerja tinggi secara kimia lebih kompleks. Keramik berkinerja tinggi membutuhkan kontrol kualitas yang lebih ketat dalam pembuatannya. Persyaratan tersebut akan meningkatkan biaya material. Material berkekuatan tinggi relatif sulit dibuat. Tekanan pembentukan untuk logam atau polimer lebih tinggi. Keausan alat lebih besar, keuletan biasanya berkurang dengan proses deformasi. Kondisi ini membuka peluang pemakaian rute proses baru, seperti investment casting atau pembentukan bubuk. Operasional peralatan cetakan lebih mahal pada suhu dan tekanan tinggi. Material dengan kinerja yang lebih baik akan memiliki konsekuensi harga material dan proses yang lebih mahal. Biaya manufaktur akan meningkat secara eksponensial terhadap tuntutan presisi dan finishing permukaan.

Kriteria Pemilihan Secara Ekonomis. Jika ingin mempertajam satu pensil maka cukup dengan pisau. Jika ada seribu pensil maka perlu penajam listrik. jika ada satu juta pensil maka dengan sistem penajaman, penjepitan dan pengasahan secara otomatis. Untuk mengatasi pensil dengan panjang dan diameter yang berbeda, maka dapat dilakukan dengan sistem yang dikendalikan oleh mikroprosesor yang dilengkapi sensor untuk mengukur dimensi pensil, tekanan pengasahan. Sistem ini disebut "**sistem cerdas**" yang dapat mengenali dan beradaptasi dengan ukuran pensil. Pilihan proses berikutnya adalah jumlah pensil yang ingin dipertajam, yaitu pada ukuran batch. Pilihan terbaik adalah yang paling murah biaya setiap pensil yang dipertajam.

Gambar 8.33 adalah skema tentang bagaimana biaya mengasah pensil yang bervariasi terhadap ukuran batch. Pisau tidak membutuhkan biaya banyak tetapi lambat, sehingga biaya tenaga kerja tinggi. Proses lainnya melibatkan investasi modal yang semakin besar tetapi melakukan pekerjaan lebih cepat, mengurangi biaya tenaga kerja. Keseimbangan antara biaya investasi dan laju penajaman dapat dibentuk kurva. Dari gambar ini diketahui bahwa pilihan terbaik adalah kurva terendah, yaitu pisau untuk penajaman hingga 100 pensil, penajam elektrik untuk $10^2 - 10^4$, sistem otomatis untuk $10^4 - 10^6$. Setiap proses memiliki ukuran batch ekonomi.



Gambar 8.33 Biaya penajaman pensil terhadap ukuran batch untuk 4 proses



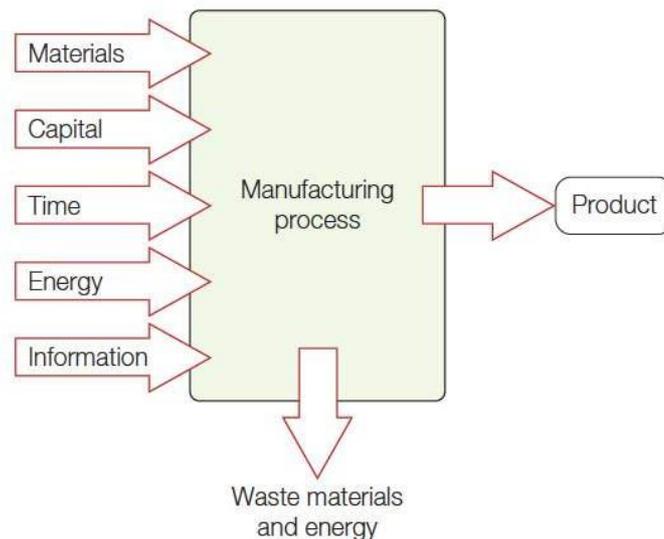
Gambar 8.34 Diagram ukuran batch ekonomis

Ukuran Batch Ekonomis. Biaya proses tergantung pada sejumlah besar variabel independen. Gambar 8.34 menunjukkan proses dengan ukuran batch ekonomi dengan rentang B_1-B_2 dapat

ditemukan berdasarkan pengalaman yakni biaya yang kompetitif ketika output terletak pada kisaran tersebut, sama seperti penajam elektrik mencapai nilai ekonomi di kisaran $10^2 - 10^4$. Cara mudah untuk memperkenalkan keekonomian sebuah proses yang dipilih adalah dengan memberi peringkat proses kandidat berdasarkan ukuran batch ekonomi.

Pemodelan Biaya

Pembuatan komponen membutuhkan sumber daya (Gambar 8.35), yang masing-masing memiliki biaya terkait. Biaya akhir adalah jumlah pengeluaran semua sumber daya yang dikonsumsi (Tabel 8.5). Dengan demikian biaya produksi komponen m massal memerlukan biaya C_m (\$/kg) dari material dan bahan bakunya. Hal ini melibatkan biaya perkakas C_t (\$) dan modal peralatan C_c (\$) di mana perkakas akan digunakan. Proses ini membutuhkan waktu yang dikenakan biaya overhead C_{oh} (satuan \$/jam) yang mencakup biaya tenaga kerja, administrasi, dan biaya pabrik secara umum. Energi yang dibebankan dalam langkah proses diperlakukan sebagai bagian dari overhead C_{oh} . Biaya informasi yang mencakup biaya penelitian dan pengembangan, royalti atau biaya lisensi dapat dianggap sebagai biaya per satuan waktu.



Gambar 8.35 Pemodelan inputan ke dalam biaya

Pembuatan komponen (satuan output) dengan berat m kg dibuat dari material dengan biaya C_m \$/kg. Kontribusi pertama untuk biaya satuan adalah material mC_m yang diperbesar dengan faktor $1/(1-f)$ di mana f adalah “*scrap fraction*”. Perbandingan permulaan material yang berakhir sebagai sprue, riser, turning, reject, atau waste (Persamaan 8.2):

$$Q_1 = \frac{mC_m}{(1 - f)}$$

Biaya C_t dari satu set perkakas (dies, molds, fixture dan jig) disebut biaya khusus yang sepenuhnya digunakan untuk menjalankan satu produksi komponen. Jika jangka panjang, penggantian akan diperlukan. Dengan demikian biaya perkakas per unit adalah (Persamaan 8.3):

$$C_2 = \frac{C_t}{n} \left\{ \text{Int} \left(\frac{n}{n_t} + 0.51 \right) \right\}$$

Dimana n_t adalah jumlah unit yang dapat dibuat oleh perkakas sebelum harus diganti, dan Int adalah fungsi bilangan bulat. Istilah dalam kurung adalah meningkatkan biaya perkakas dengan satu alat yang ditetapkan setiap kali n melebihi n_t .

Tabel 8.5 Symbol, definition, and units		
Resource	Symbol	Unit
Material: including consumable	C_m	\$/kg
Capital: Cost of tooling	C_t	\$
Cost of equipment	C_c	\$
Time: overhead rate, including labor, administration, rent	\dot{C}_{oh}	\$/hr
Energy: cost of energy	\dot{C}_e	\$/hr
Information: R and D or royalty payment	\dot{C}_i	\$/year

Mengubah biaya modal peralatan khusus dan biaya peminjaman modal sebagai overhead dibagi dengan modal t_{wo} (misal: 5 tahun) yang akan dikembalikan. Kuantitas C_c/t_{wo} kemudian biaya per jam. Biaya per unit kemudian biaya per jam ini dibagi dengan rata-rata n di mana satuan diproduksi (Persamaan 8.4):

$$C_3 = \frac{1}{n} \frac{C_c}{Lt_{wo}}$$

Akhirnya ada overhead rate \dot{C}_{oh} . Nilai ini menjadi biaya per unit ketika dibagi dengan tingkat produksi \dot{n} satuan per jam (Persamaan 13.5):

$$C_4 = \frac{\dot{C}_{oh}}{\dot{n}}$$

Total biaya pembentukan setiap komponen adalah jumlah dari empat istilah ini dengan bentuk sebagai berikut (Persamaan 13.6):

$$C = \frac{mC_m}{(1-f)} + \frac{C_t}{n} \left\{ \text{Int} \left(\frac{n}{n_t} + 0.51 \right) \right\} + \frac{1}{\dot{n}} \left(\frac{C_c}{Lt_{wo}} + \dot{C}_{oh} \right)$$

Biaya memiliki tiga kontribusi penting: (1) biaya material per unit produksi yang independen dari ukuran dan tingkat batch, (2) biaya khusus per unit produksi yang bervariasi sebagai timbal balik volume produksi ($1/n$), dan (3) overhead kotor per unit produksi yang bervariasi sebagai timbal balik dari tingkat produksi ($1/n$). Persamaan ini menjelaskan satu set kurva yang berkaitan dengan biaya C untuk ukuran batch n , satu untuk setiap proses. Masing-masing memiliki bentuk kurva penajam pensil Gambar 8.33.

Pemodelan biaya teknis. Persamaan 8.6 adalah langkah pertama dalam biaya pemodelan. Daya prediktif yang lebih besar dimungkinkan dengan model biaya teknis yang mengeksplorasi pemahaman tentang cara desain, proses, dan biaya berhubungan. Biaya modal

peralatan tergantung pada ukuran dan tingkat otomatisasi. Biaya perkakas dan tingkat produksi tergantung pada kompleksitas.

8.6 Proses Pemilihan Berbasis Komputer

Skrining. Jika atribut proses disimpan dalam database dengan antarmuka pengguna yang sesuai, bagan pemilihan dapat dibuat dan kotak pilihan dimanipulasi dengan kebebasan yang jauh lebih besar. Database berisi rekaman, masing-masing menjelaskan atribut dari satu proses. Contoh 8.1 menunjukkan bagian dari catatan khas untuk cetakan injeksi.

Skema menunjukkan cara kerja proses didukung oleh deskripsi singkat. Ini diikuti oleh daftar atribut: bentuk yang dapat dibuatnya, atribut yang berkaitan dengan bentuk dan karakteristik fisik, dan yang menggambarkan parameter ekonomi, diakhiri dengan dokumentasi singkat dalam bentuk pedoman, catatan teknis, dan penggunaan umum. Atribut numerik disimpan sebagai rentang yang menunjukkan kisaran kemampuan proses. Setiap catatan ditautkan ke rekaman untuk materi yang kompatibel dengannya, memungkinkan pilihan material untuk digunakan sebagai kriteria penyaringan, seperti matriks kompatibilitas material Gambar 8.22 tetapi dengan resolusi yang lebih besar.

Daftar pendek kandidat diekstraksi dalam dua langkah: penyaringan untuk menghilangkan proses yang tidak dapat memenuhi spesifikasi desain, dan peringkat untuk proses berdasarkan kriteria ekonomi. Untuk mengaktifkan ini, model biaya yang dijelaskan dalam Bagian 8.6 diterapkan dalam perangkat lunak CES. Catatan tersebut berisi perkiraan data untuk kisaran biaya permodalan dan perkakas (C_c dan C_i) dan untuk tingkat produksi (n).

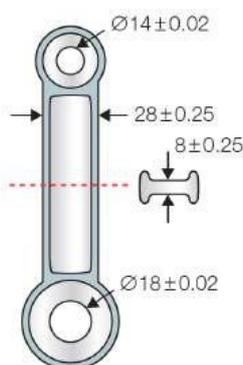
Persamaan 8.6 berisi parameter lain yang tidak tercantum dalam catatan karena bukan atribut proses itu sendiri tetapi tergantung pada desain, atau material, atau ekonomi. Pengguna harus memberikan informasi ini, dengan mudah dimasukkan melalui kotak dialog. Output adalah plot biaya terhadap ukuran batch, seperti yang ditunjukkan sebelumnya pada Gambar 8.33. Informasi lebih lanjut tentang pemilihan bero dibantu komputer dapat ditemukan di sumber yang tercantum di bawah Desain Granta (2010) dalam "Bacaan lebih lanjut."

STUDI KASUS PEMILIHAN PROSES MANUFAKTUR

Studi kasus pemilihan proses mengikuti yaitu mencantumkan persyaratan desain: bahan, bentuk, ukuran, penampang minimum, kepresisian, dan finishing. Persyaratan desain kemudian diplot ke matriks proses dan mengidentifikasi area pencarian. Proses yang terletak di dalam area pencarian menunjukkan kapabilitas komponen dapat dibuat dengan proses tertentu sesuai spesifikasi desainnya. Kelompok ini disebut sebagai kandidat. Jika tidak ada satu proses yang memenuhi semua persyaratan desain, maka proses harus disusun (*stacked*), misalnya pengecoran diikuti permesinan untuk memenuhi spesifikasi toleransi permukaan atau metode bubuk diikuti oleh pengerindaan.

9.1 Pengecoran Con-Rod Aluminum

Connecting rod berfungsi untuk menghubungkan gerakan osilasi menjadi gerakan putar pada mesin pembakaran dalam, atau gerakan putar menjadi gerakan osilasi pada pompa.



Gambar 9.1 Batang penghubung. Ketepatan ukuran dan permukaan lubang bor lebih tinggi dari bagian lainnya, yang membutuhkan pemesinan berikutnya.

Persyaratan desain. Con-rod adalah bentuk 3D padat yang terbuat dari paduan nonferrous. Dimensi con-rod sedemikian rupa sehingga massanya sekitar 0.3 kg dan penampang minimumnya 8 mm. Presisi dan toleransi pengecoran tidak penting karena lubang boran dan permukaannya masih dikerjakan lanjut untuk memperoleh persyaratan yang diinginkan. Asumsikan ukuran batch 100.000. Persyaratan desain tersebut dapat disusun seperti pada Tabel 9.1.

Pemilihan. Batasan diplot pada matriks proses dan grafik pada Gambar 14.4 hingga 14.10. Material, bentuk, dan ukuran batch yang diperlukan menghilangkan sebagian besar proses yang tercantun dan menyisakan tiga proses pengecoran dan pemesinan. Permesinan ditolak dengan alasan pemborosan material maka tinggal pengecoran pasir, pengecoran cetakan, dan pengecoran tekanan rendah (Tabel 9.2).

Tahapan lebih lanjut adalah memeriksa biaya relatifnya dengan menggunakan model Persamaan 8.6. Data yang relevan disusun dalam Tabel 9.3, dimana semua biaya dinormalisasi dengan biaya material, $mC_m / (1 - f)$. Hasilnya diplot dalam Gambar 9.2 sebagai kurva biaya

unit C versus ukuran batch n mengikuti contoh di Gambar 8.33. Pada ukuran batch kecil, biaya unit didominasi oleh biaya tetap perkakas (istilah kedua di sebelah kanan Persamaan 8.6). Ketika ukuran batch n meningkat, kontribusinya jatuh (perkakas memiliki umur yang lebih besar daripada n) sampai meratakan pada nilai yang didominasi oleh biaya "variabel" material, tenaga kerja, dan overhead lainnya.

Tabel 9.1 Persyaratan desain con-rod	
Function	Connecting rod
Constraints	a. Technical constraints: (1) Material: aluminum casting alloy, (2) Shape: solid, 3D, (3) Estimated mass: 0.3-0.4 kg, (4) Minimum section: 8 mm b. Quality constrains: (1) Tolerance <1.0 mm (surfaces), <0.02 mm (bores), (2) Roughness: not critical c. Economic constraint: Batch size: 100,000
Objective	Minimize cost
Free variables	Choice of process Process-operating conditions

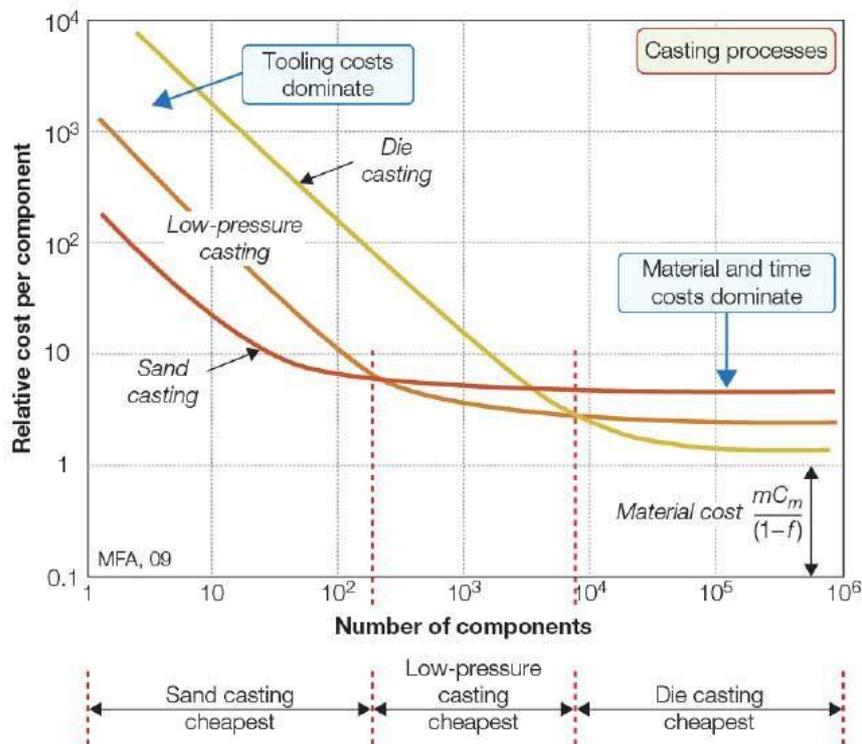
Tabel 9.2 Daftar proses pembentukan con-rod	
Process	Comment
Sand casting plus machining Low pressure casting Die casting	Bagan proses-toleransi, Gambar 9.8, mengungkapkan bahwa tidak satu pun dari proses ini yang dapat memenuhi persyaratan tentang toleransi pengeboran. Semua akan memerlukan operasi pemesinan berikutnya.

Proses yang bersaing biasanya berbeda dalam biaya perkakas C_t dan tingkat produksi n , yang menyebabkan kurva $C - n$ berpotongan. Peralatan pengecoran pasir murah tetapi prosesnya lambat. Biaya cetakan untuk pengecoran tekanan rendah lebih besar daripada untuk pengecoran pasir, dan prosesnya sedikit lebih cepat. Peralatan die-casting harganya jauh lebih mahal tetapi jauh lebih cepat. Biaya material, biaya tenaga kerja per jam, dan waktu pengembalian modal.

Kurva untuk pengecoran pasir, pengecoran tekanan rendah, dan pengecoran cetakan bersinggungan pada ukuran batch 200. Pengecoran pasir lebih ekonomis. Pengecoran tekanan rendah menjadi jauh lebih murah daripada yang lain untuk batch antara 200 dan 8000, di atasnya adalah die casting menjadi pilihan paling ekonomis. Pilihan terbaik untuk ukuran batch 100.000 adalah die casting. Untuk batch kecil, biaya komponen didominasi oleh perkakas. Ketika ukuran batch bertambah, kontribusi dalam persamaan biaya berkurang. Jika prosesnya cepat, maka biaya unit turun sampai sekitar tiga kali lipat dari komponen material yang dibuat.

Postscript. Ada masalah kualitas selain kepresisian dan kehalusan yang masuk ke dalam pilihan proses. Coran pasir cenderung terbentuk gelembung dan inklusi yang bertindak sebagai titik awal retakan fatik dalam komponen yang dibebani secara berulang seperti con-rod. Beberapa teknik pengecoran tekanan rendah, aliran logam cair masuk ke dalam cetakan akan

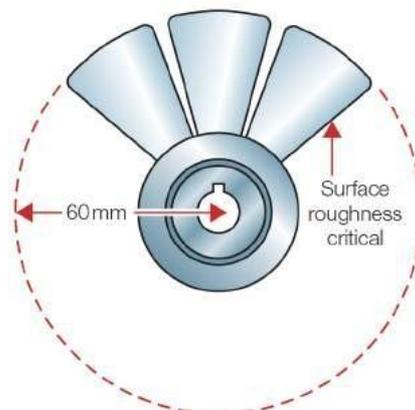
mengurangi cacat. Die casting menggunakan tekanan yang lebih tinggi, dan umumnya memberikan casting berkualitas tinggi. Pertimbangan seperti ini dapat menggeser titik peralihan ekonomi, memperluas rentang batch ekonomi dari proses yang menawarkan kualitas tertinggi.



Gambar 9.2 Biaya pengecoran relatif con-rod sebagai fungsi produksi

9.2 Pembentukan Kipas

Kipas untuk penyedot debu (Gambar 9.3) dirancang agar murah, stabil, dan efisien. Untuk meminimalkan biaya adalah proses pembentukan kipas hingga bentuk akhir dalam satu proses dan hanya menyisakan hub tengah yang akan dikerjakan dengan permesinan. Hal ini berarti pemilihan satu proses yang dapat memenuhi spesifikasi presisi dan toleransi, menghindari kebutuhan permesinan atau finishing disk atau sudu (*blades*).

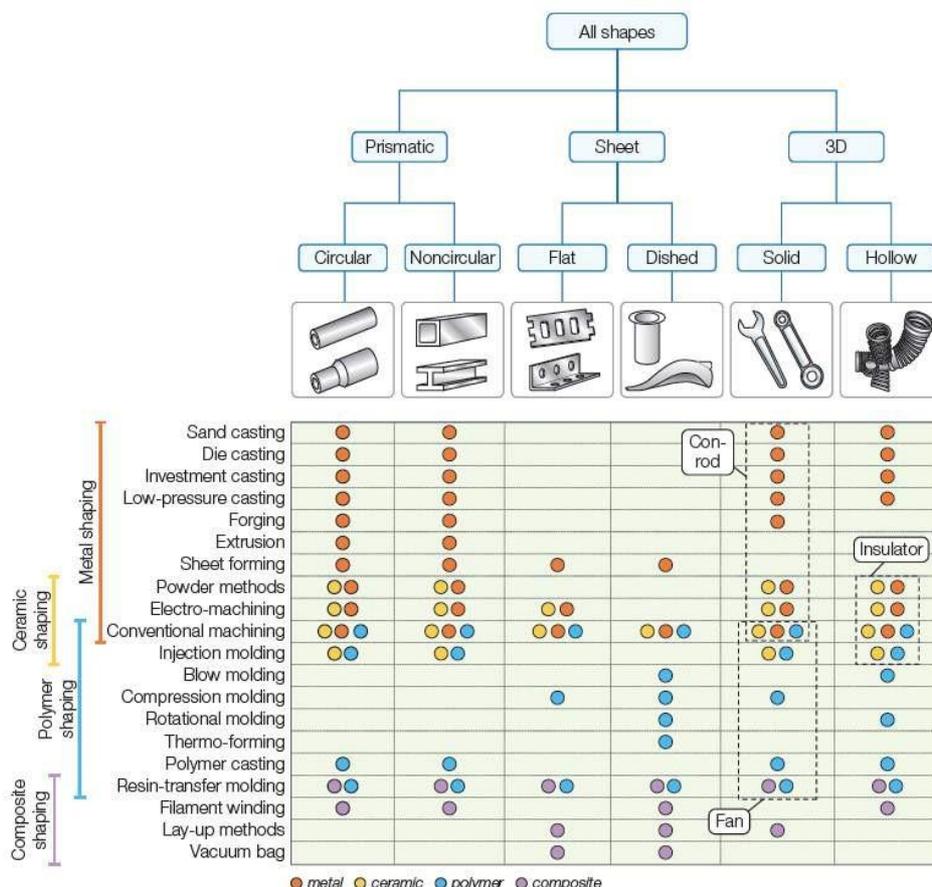


Gambar 9.3 Kipas (*fan*) dibuat dari nylon, memerlukan kekasaran yang rendah dan kepresisian tertentu, dan diproduksi dalam jumlah yang besar.

Persyaratan desain. Nilon adalah material pilihan untuk kipas angin. Laju pemompaan kipas ditentukan oleh laju putaran dan ukurannya. Desainer menghitung kebutuhan kipas dengan radius 60 mm, jumlah 12 bilah profil dengan ketebalan rata-rata 4 mm. Volume material kipas adalah luas permukaan dikalikan dengan tebalnya, sekitar 10^{-4} m^3 . Berat material diperoleh dengan mengalikan densitas nilon (1100 kg/m^3) di kisaran 0.1 hingga 0.15 kg. Kipas memiliki bentuk yang cukup kompleks dengan kesimetrisan yang tinggi.

Tabel 9.4 Persyaratan proses pada kipas (*fan*)

Function	Fan
Constraints	Technical constraints: (1) material: nylon, (2) estimated mass: 0.1-0.15 kg, (3) minimum section: 4 mm, (4) shape: solid, 3D. Quality constraints: (1) tolerance: $\pm 0.5 \text{ mm}$, (2) roughness: $< 1 \mu\text{m}$. Economic constraint: batch size: 100,000
Objective	Minimize cost
Free variables	Choice of process Process-operating conditions



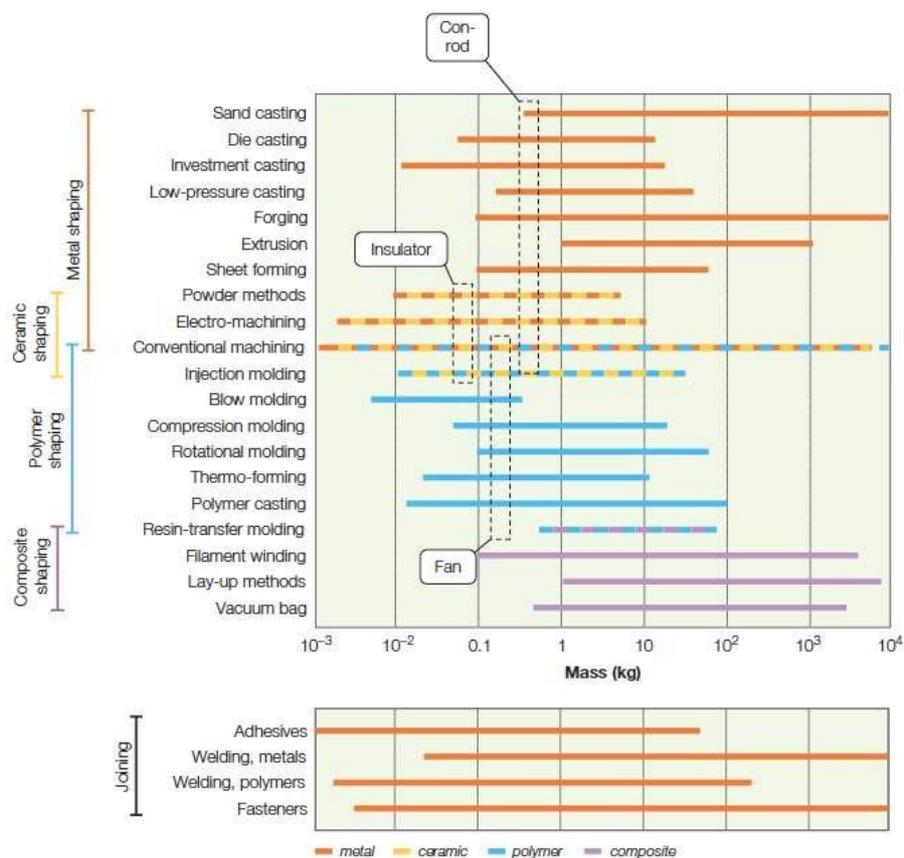
Gambar 14.5 Matriks proses-kompatibilitas bentuk, yang menunjukkan persyaratan studi kasus. Ringkasan kompatibilitas material muncul di sebelah kiri. Perpotongan tahap seleksi ini dan yang terakhir mempersempit pilihan.

Kendala toleransi dan keadatan hanya batas atas (Gambar 9.8 dan 9.9); ketiga kelas proses bertahan. Ukuran batch yang direncanakan 10.000 diplot pada grafik ukuran batch ekonomi (Gambar 9.10) menghilangkan permesinan dari padat. Proses yang masih ada tercantum dalam Tabel 9.5.

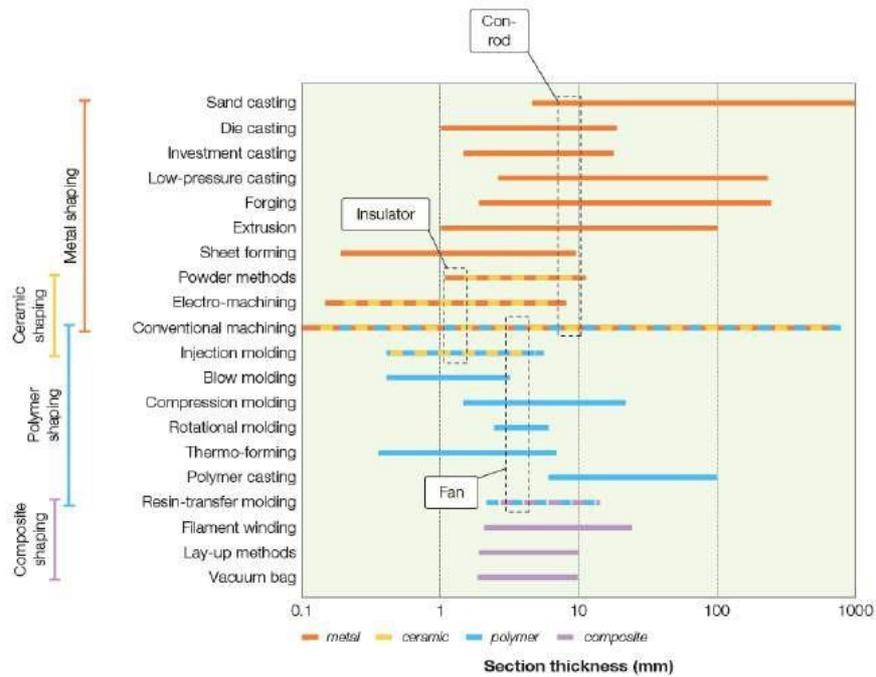
Table 9.5 Processes for forming the fan	
Process	Comment
Injection molding	Injection molding meets all the design requirements; compression molding may require further finishing operations
Compression molding	

Dalam pandangan desainer, kesetimbangan dan kehalusan permukaan adalah pertimbangan yang benar-benar penting. Geometri menentukan efisiensi pemompaan kipas dan kebisingan yang ditimbulkannya. Desainer menentukan toleransi ± 0.5 mm dan kekasaran permukaan $\leq 1\mu\text{m}$. Produksi kipas diperkirakan sebesar 10,000.

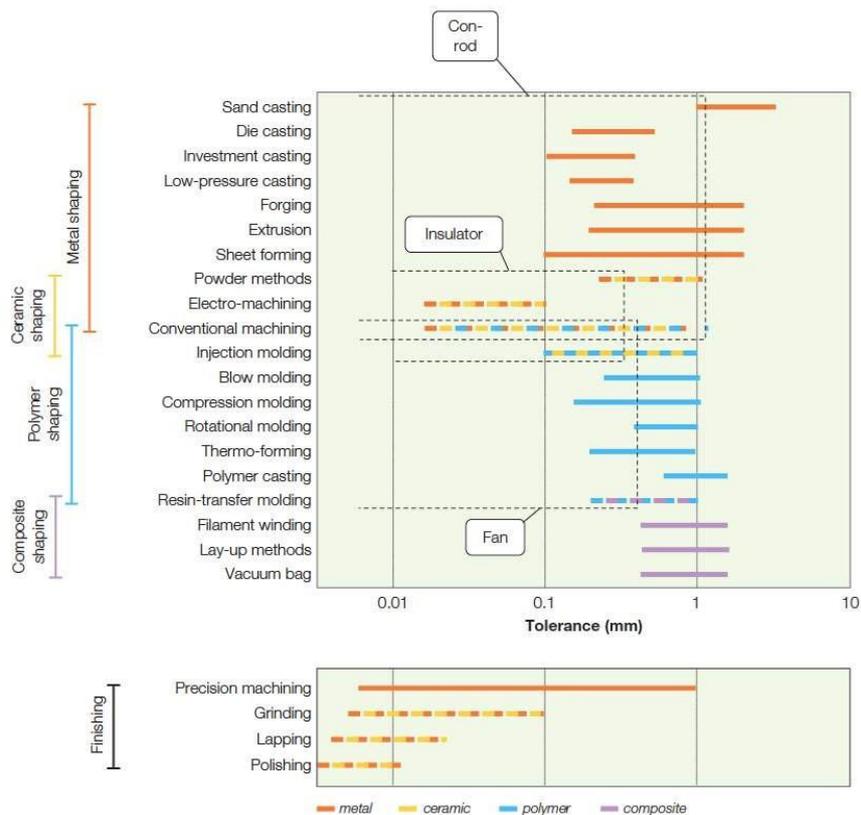
Pemilihan. Perhatikan matriks material-proses (Gambar 9.4) dan matriks bentuk-proses (Gambar 9.5) di mana kotak pemilihan telah digambar. Perpotongan keduanya menyisakan lima kelas proses pembentukan (yang dikotak di angka kedua. Penyaringan pada massa dan ketebalan penampang (Gambar 9.6 dan 9.7) menghilangkan pengecoran polimer dan RTM, meninggalkan tiga lainnya.



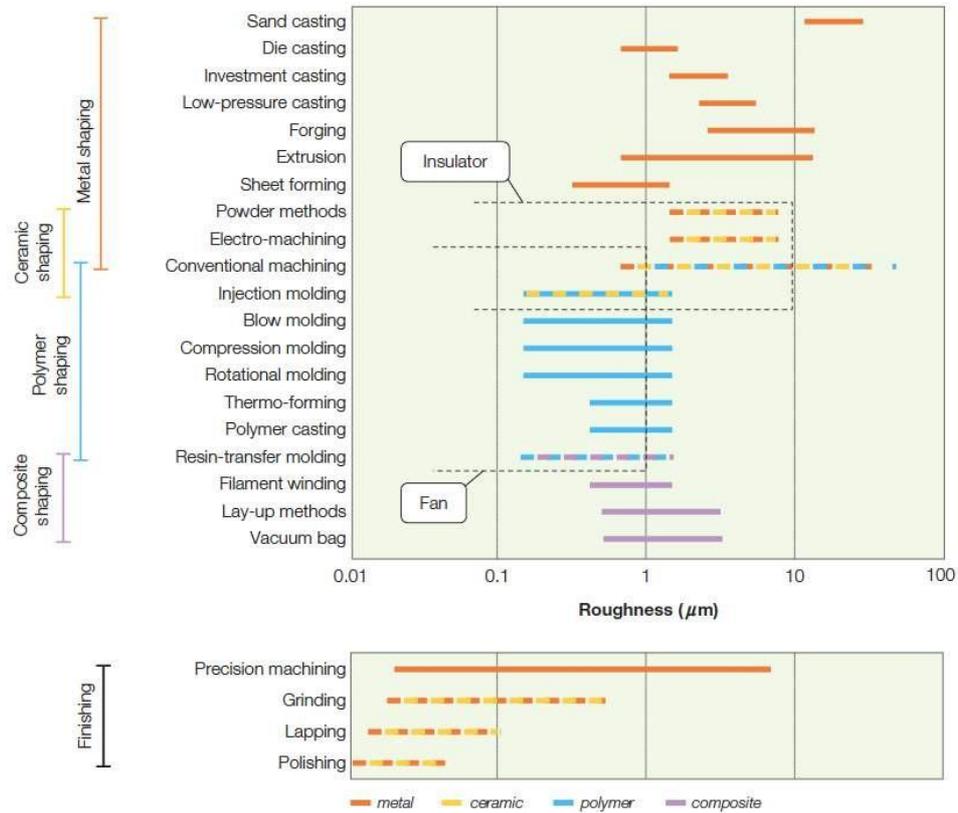
Gambar 9.6 Diagram rentang proses-massa, yang menunjukkan persyaratan dari tiga studi kasus. Dimasukkannya proses assembling memungkinkan fabrikasi struktur besar untuk dieksplorasi.



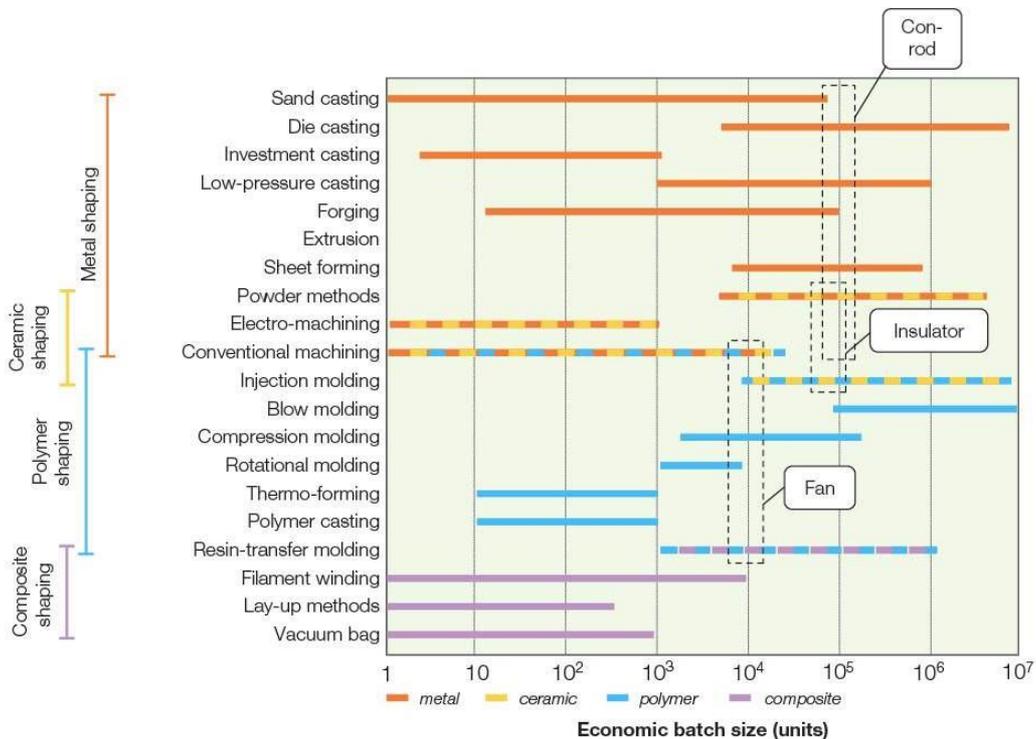
Gambar 9.7 Diagram proses-ketebalan penampang, yang menunjukkan persyaratan studi kasus



Gambar 9.8 Diagram proses-toleransi yang menunjukkan persyaratan studi kasus. Dimasukkannya proses penyambungan dan finishing memungkinkan fabrikasi struktur besar dapat dieksplorasi. Toleransi dan kekasaran permukaan ditentukan sebagai batas atas saja, sehingga kotak pemilihan (kiri) terbuka.



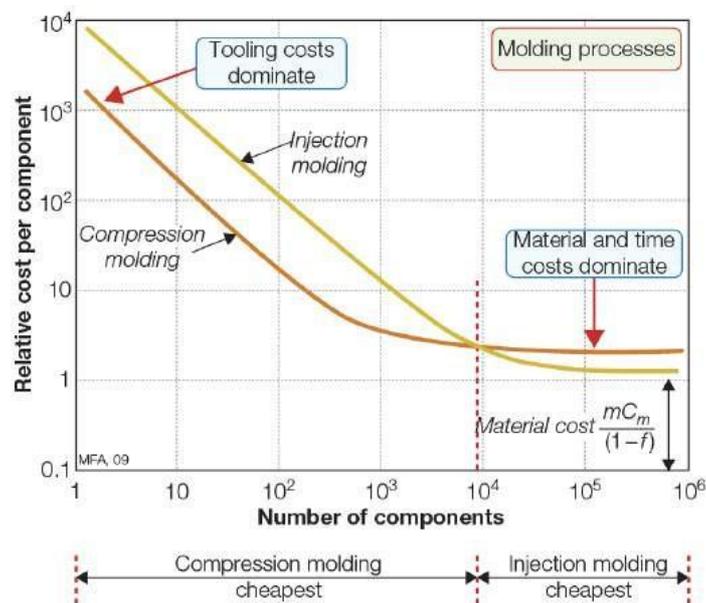
Gambar 9.9 Diagram proses-kekasaran permukaan. Hanya satu kasus, kipas (*fan*) diperlakukan pembatasan.



Gambar 9.10 Diagram proses-batch ekonomis-ukuran yang menunjukkan persyaratan dari tiga studi kasus. Kotak untuk tabel optik mencakup rentang volume produksi yang tercantum dalam persyaratan.

Relative cost	Compression molding	Injection molding	comment
Material, $mC_m/(1-f)$	1	1	Process-independent parameters
Basic overhead C_{oh} (hr^{-1})	20	20	
Capital write-off time two (yrs)	5	5	
Load factor	0.5	0.5	
Dedicated tool cost, C_t	2,000	10,000	Process-independent parameters
Capital cost, C_c	20,000	100,000	
Batch rate, n (hr^{-1})	30	150	
Tool life, n_t (number of units)	100,000	200,000	

Untuk melangkah lebih jauh kita membutuhkan model biaya. Data yang diperlukan untuk mengimplementasikan data CES dikumpulkan dalam Tabel 9.6. Gambar 9.11 menunjukkan kurva biaya yang dihasilkan. Perangkat untuk cetakan kompresi lebih murah daripada cetakan injeksi, hanya saja lebih lambat karena menggunakan multiple die cavities, injection molding dapat menghasilkan beberapa unit dalam satu kali tembakan. Hal ini dapat membuat dua kurva berpotongan pada sekitar 10,000 unit. Di bawah titik potong ini, cocok menggunakan cetakan kompresi (*compression molding*) karena lebih murah, sedangkan di atas ini dapat digunakan cetakan injeksi (*injection molding*).

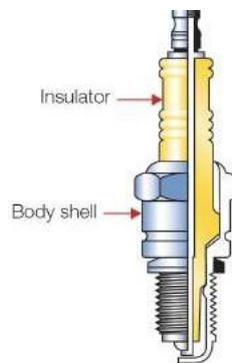


Gambar 9.11 Biaya relatif untuk mencetak kipas sebagai fungsi dari produksi berjalan. Biaya dinormalisasi oleh biaya material.

Postscript. Seperti biasanya akan selalu muncul pertimbangan lain, seperti pertanyaan tentang investasi modal, keterampilan lokal, overhead rate, dan sebagainya. Grafik tidak dapat menjawab ini. Tetapi prosedur ini telah membantu dalam mempersempit pilihan, memberikan alternatif, dan memaparkan latar belakang di mana seleksi akhir dapat dilakukan.

9.3 Insulator Busi

Kesulitan menggunakan diagram hard-copy untuk pemilihan proses. Diagram memiliki resolusi terbatas dan canggung untuk digunakan. Metode berbasis komputer mengatasi kedua masalah tersebut. Dengan system CES memungkinkan untuk membuat batasan pada material, bentuk, massa, penampang, toleransi, dan kekasaran permukaan dapat mempertemukan semua batas. Tinjauan secara ekonomis diuji dengan plot ukuran batch yang diinginkan pada diagram batang ukuran batch ekonomi, atau dengan menerapkan model biaya yang dibangun ke dalam perangkat lunak. Jika persyaratannya dipaksakan maka tidak ada satu proses pun yang dapat memenuhi. Prosedur berikutnya adalah melonggarkan tuntutan yang paling diminta (toleransi dan kekasaran permukaan) dan mencari proses yang dapat bersesuaian dengan persyaratan yang lain. Diperlukan proses kedua menyempurnakan yang kehalusannya.



Gambar 9.12 Busi

Table 9.7 Process requirement for the spark plug insulator

Function	Insulator
Constraints	Technical constraints: (1) material: alumina, (2) shape: 3D hollow, (3) mass: 0.04-0.06kg, (4) minimum section: 1.5mm. Quality constraints: (1) surface roughness: $< 10\mu\text{m}$, (2) tolerance: $< \pm 0.3\text{mm}$.
Objective	Economic constraint: batch size: 100,000 Minimize cost
Free variables	Choice of process Process operating conditions

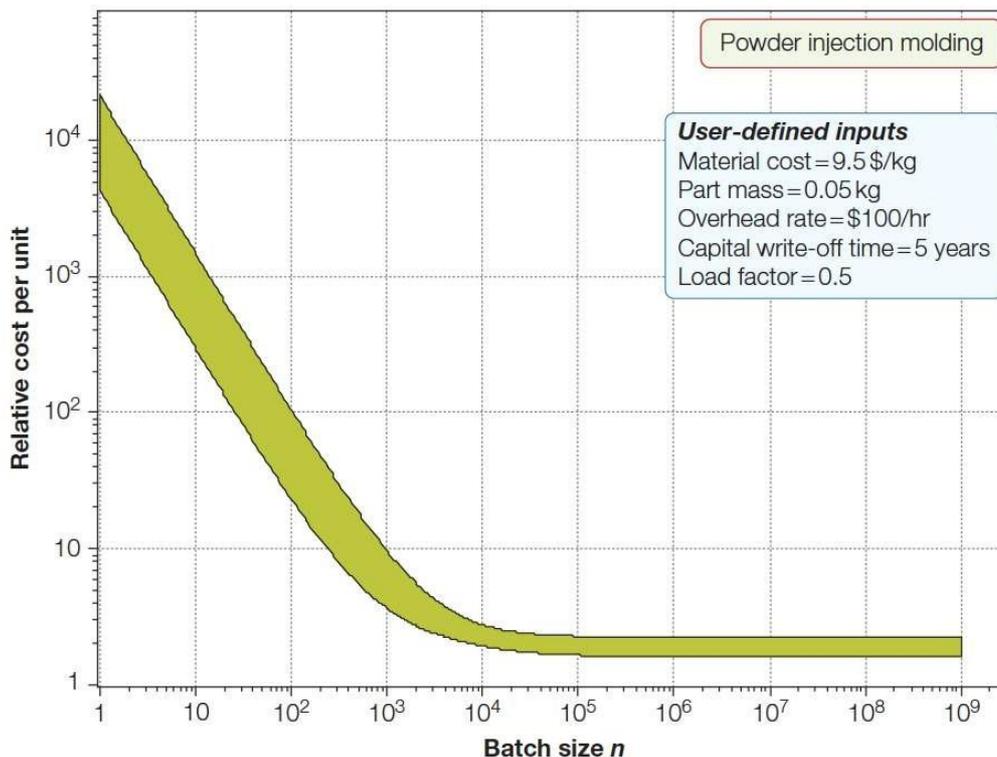
Persyaratan Desain. Struktur busi dibuat sketsa pada Gambar 9.12. Insulator dibuat dari keramik, alumina, dengan bentuk yang ditunjukkan pada gambar: axisymmetric, hollow, bentuk bertingkat. Beratnya sekitar 0.05 kg dan memiliki penampang minimum 1.2 mm. Presisi merupakan masalah yang urgen, karena insulator merupakan bagian dari perakitan. Spesifikasi desain menentukan kepresisian 0.3 mm dan finishing permukaan lebih baik dari 10 μm . Insulator dibuat dalam jumlah besar dengan proyeksi ukuran batch 100.000. Biaya harus ditekan serendah mungkin. Tabel 9.7 merangkum persyaratan tersebut.

Pemilihan. Batasan diplot pada matriks kompatibilitas dan diagram batang di Gambar 9.4 hingga 9.10. Hanya satu kelompok proses yang tersisa, yaitu “**metode bubuk**”. Ukuran batch yang diperlukan sebanyak 100,000 yang terletak dalam kisaran ekonominya (Gambar 9.6).

Kelompok metode bubuk meliputi banyak proses yaitu: *die pressing* dan *sintering*, *hot pressing*, *powder extrusion*, *powder injection molding*, *hot isostatic pressing*, dan *spray deposition*. Lebih baik mengelola informasi dalam lingkungan berbasis komputer. Sistem CES dapat melakukan ini.

Dengan menerapkan batasan yang tercantum dalam Tabel 9.7 maka akan menyisakan dua proses dalam database, yaitu: *die pressing* dan *sintering* dan *powder injection molding* (PIM). PIM adalah proses pembentukan bubuk melalui pencampuran dengan pengikat polimer, molding, kemudian membakar pengikat selama sinter berikutnya. Dengan menerapkan sistem yang sama pada model biaya seperti diskusi sebelumnya.

Outputnya adalah menunjukkan biaya dalam satuan biaya material untuk PIM seperti pada Gambar 9.13. Input yang ditentukan pengguna tercantum di kanan atas. Biaya satuan tinggi pada ukuran batch yang rendah, jatuh ke sekitar dua kali lipat dari material pada ukuran batch di atas sekitar 10,000.

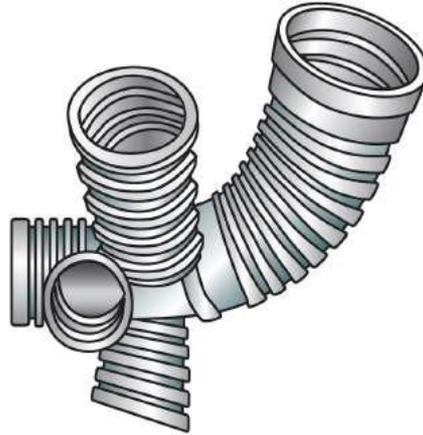


Gambar 9.13 Biaya satuan sebagai fungsi ukuran batch powder-injection molding untuk insulator kecil. Biaya dinormalisasi oleh biaya material.

Postscript. Insulator dibuat secara komersial dengan PIM. Secara ekonomi, untuk produk yang diproduksi secara massal seperti ini, sangat penting. Pemodelan biaya teknis dijelaskan sebelumnya di Bab 13, dapat memandu pilihan peralatan yang terbaik dan kondisi operasional yang optimal untuk meminimalkan biaya.

9.4 Pelindung Manifold

Persyaratan desain. Jacket manifold ditunjukkan oleh Gambar 9.14 adalah bagian dari sistem propulsi kendaraan ruang angkasa. Komponen terbuat dari nikel dengan berat sekitar 7 kg, kompleks, memiliki bentuk tidak simetri 3D-berongga. Ketebalan penampang minimum adalah antara 2 dan 5 mm. Persyaratan presisi dan finishing permukaan (toleransi $< \pm 0.1$ mm, kekasaran $< 20\mu\text{m}$). Karena aplikasinya terbatas, hanya 20 satuan yang harus dibuat. Tabel 9.8 mencantumkan persyaratan.



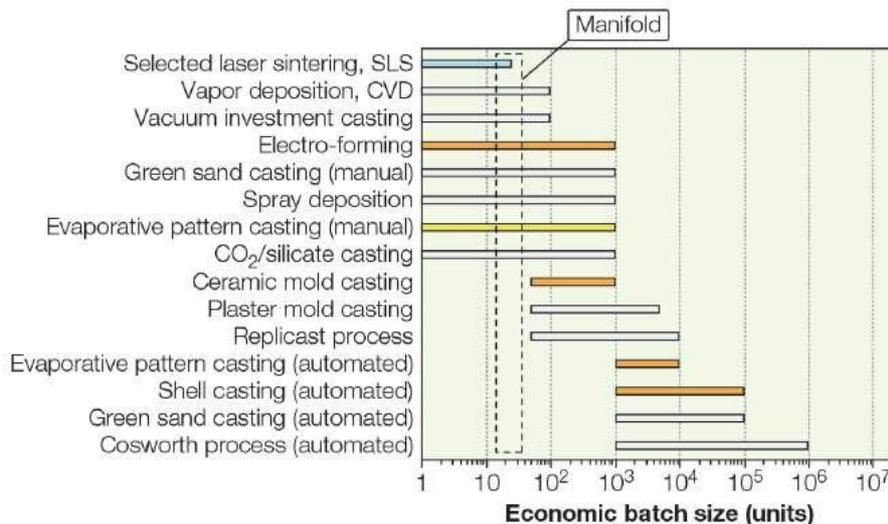
Gambar 9.14 Pelindung manifold

Pemilihan. Batasan diterapkan dengan memasukkannya ke dalam kotak dialog limit-selection seperti di Gambar 5.12. Batasan material (nikel) dan batasan bentuk (3D hollow) mengurangi jumlah proses. Gambar 9.15 menunjukkan 15 yang masih bertahan. Batasan berikutnya pada massa dan ketebalan penampang mengurangi lebih banyak lagi dan hanya menyisakan enam. Dengan menerapkan batasan toleransi dan kekasaran permukaan mengurangi semua proses kecuali satu, yaitu elektroforming. Ukuran batch yang diperlukan terletak dalam jangkauannya.

Table 5.8 Process requirements for the manifold jacket

Function	Manifold jacket
Constraints	Technical constraints: (1) material: nikel, (2) shape: 3D hollow, (3) minimum section: 1-2 mm, (4) mass: 7 kg. Quality constraints: (1) tolerance: $< \pm 0.1$ mm, (2) surface roughness: $< 20 \mu\text{m}$ Economic constraint: batch size 20
Objective	Minimize cost
Free variables	Choice of process Process-operating conditions

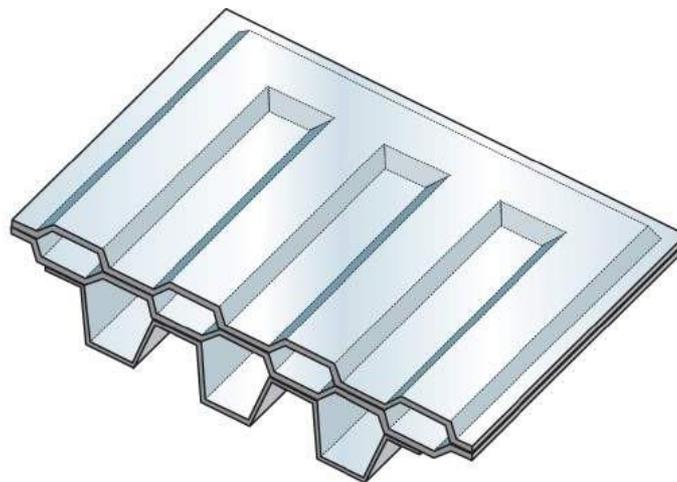
Postscript. Pencarian informasi lebih lanjut dalam sumber yang tercantum dalam Lampiran D mengungkapkan bahwa elektroforming nikel adalah praktik yang sudah mapan dan komponen sebesar 20 kg. Sepertinya ini pilihan yang bagus.



Gambar 9.15 Keluaran dari pemilihan proses berbasis komputer untuk membuat manifold. Proses abu-abu telah gagal satu atau lebih batasan.

9.5 Menggabungkan Radiator Baja

Gambar 9.16 menunjukkan penampang radiator domestik yang terbuat dari baja lembaran bergelombang yang di-press. Tugasnya adalah memilih proses bergabung untuk jahitan di antara lembaran.



Gambar 9.16 Penampang radiator domestik. Tiga penampang baja press yang digabung dengan sambungan kampuh.

Persyaratan desain. Proses harus kompatibel dengan material lembaran baja karbon rendah dengan ketebalan 1.5 mm. Sambungan kampuh (*lap joint*) mendukung beban rendah selama layanan tetapi instalasi mengalami tegangan tarik dan geser. Material radiator harus dapat mengantarkan panas, kedap air, dan sanggup bekerja hingga 100⁰C. Tidak memerlukan sambungan yang bongkar pasang. Tabel 9.9 meringkas translasi.

Pemilihan. Sistem CES memiliki catatan dan atribut untuk 52 proses sambungan. Dengan menerapkan batasan material maka meninggalkan 32 dengan menghilangkan polimer atau komposit. Penyaringan (*screening*) pada geometri geometri, model pembebanan, dan ketebalan

penampang dapat mengurangi proses menjadi 20. Persyaratan menghantarkan panas dapat mengurangi proses menjadi 12. Ketahanan air dan suhu operasi tidak mengubah daftar pendek proses yang dipilih. Proses yang melewati tahap penyaringan tercantum dalam Tabel 9.10.

Tabel 9.9 Translasi penggabungan radiator baja	
Function	Domestic radiator
Objective	Minimize cost
Constraints	Technical constraints: (1) material compatibility: low carbon steel, (2) joint geometry: lap joint, (3) mode of loading: tension, shear (moderate), (4) sheet thickness: 1-2mm, (5) joint must conduct heat, joint must be watertight, (6) service temperature > 100 ⁰ C, (7) disassembly not required
Free variables	Choice of shaping process Process operating conditions

Tabel 9.10 Daftar pendek proses pada penggabungan radiator baja	
Process	Comment
Soldering	Risk of corrosion arising from dissimilar metals in electrical contact
Brazing	
Laser beam welding	Expensive, specialized processes
Electron beam welding	
Explosive welding	Well-established, conventional welding processes
Metal inert gas arc welding (MIG)	
Tungsten inert gas arc welding (TIG)	
Manual metal arc welding (MMA)	
Oxyacetylene welding	
Projection welding	
Seam welding	

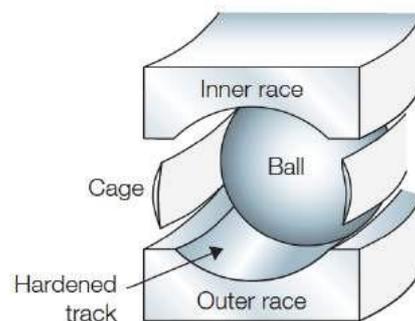
Postscript. Pada tahapan ini diperlukan penelusuran dokumentasi proses. Explosive welding membutuhkan fasilitas khusus dan izin. Pengelasan elektron dan laser membutuhkan peralatan yang mahal. Resistance spot welding dikeluarkan dari screening karena gagal persyaratan menjadi kedap air. Baja rendah karbon mudah dilas, pengelasan akan menyebabkan retak atau penggetasan dapat diperiksa dengan mencari dokumentasi.

9.6 Pengerasan Permukaan pada Lintasan Bantalan Bola

Bola-bola baja berjalan di sepanjang lintasan beralur (Gambar 9.17). Umur lintasan bola baja dibatasi oleh keausan dan kelelahan. Keduanya ditekan dengan menggunakan material keras. Material keras cenderung tidak ulet sehingga menimbulkan risiko bahwa pembebanan kejut atau kesalahan penanganan dapat menyebabkan lintasan patah.

Persyaratan desain. Solusinya adalah menggunakan baja paduan, yang memiliki sifat sangat baik. Perlakuan permukaan dilakukan untuk meningkatkan kekerasannya. Proses untuk

mengeraskan permukaan baja paduan agar memiliki ketahanan aus dan kelelahan. Kepresisian bola dan lintasan sangat penting, sehingga prosesnya tidak mengganggu dimensi atau kehalusan permukaan. Tabel 9.11 menunjukkan proses translasi.



Gambar 9.17 Penampang lintasan bola baja. Permukaan lintasan diperkeras untuk menahan keausan dan nukleasi retakan fatik.

Pemilihan. Sistem CES berisi catatan tentang 46 proses perlakuan permukaan, yang kompatibel dengan baja paduan. Pembedanya adalah tujuan perlakuan untuk memberikan ketahanan lelah dan aus sehingga menyisakan 8 daftar kandidat proses. Persyaratan permukaan yang sangat halus menghilangkan proses coating atau deformasi permukaan karena dapat berkompromi dengan proses finishing. Menambahkan batasan lebih lanjut yang mencakup permukaan melengkung dapat baik atau sangat baik meninggalkan lima kandidat seperti yang tercantum dalam Tabel 9.12. Catatan untuk ini menggambarkan dan mengilustrasikan proses, dan merangkum penggunaan khususnya.

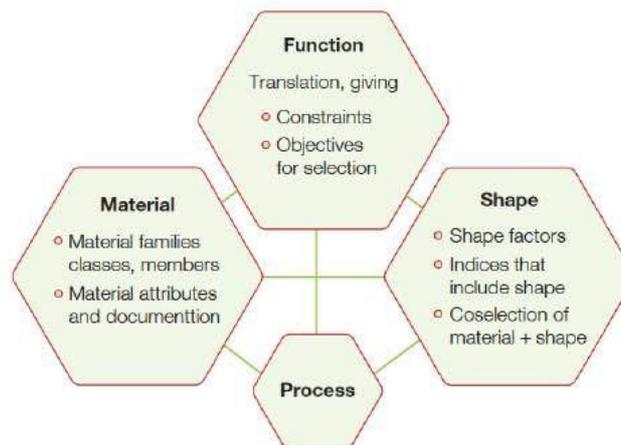
Tabel 9.11 Translation for surface-hardening a ball-bearing race	
Function	Ball-bearing race
Objective	Minimize cost
Constraint	Technical constraint: (1) material: alloy steel, (2) function of treatment: hardening for fatigue and wear resistance, (3) curved surface coverage: good
Free variable	Quality constraint: (1) precision, (2) surface finish do not compromise Choice of surface treatment process Process operating conditions

Tabel 9.12 Shortlist of processes for hardening an alloy steel ball race	
Carburizing Carbo-nitriding Aluminizing Boriding Chromizing	All are high-temperature, diffusion-controlled processes, and so are slow. Documentation in the records gives details

Postscript. Kekerasan permukaan dan kedalaman lapisan yang dikeraskan tergantung pada variabel proses: waktu dan suhu perlakuan dan komposisi baja. Lintasan bola baja dibuat dalam jumlah besar, ukurannya beragam, dan geometrinya tetap.

PEMILIHAN MATERIAL DAN BENTUK

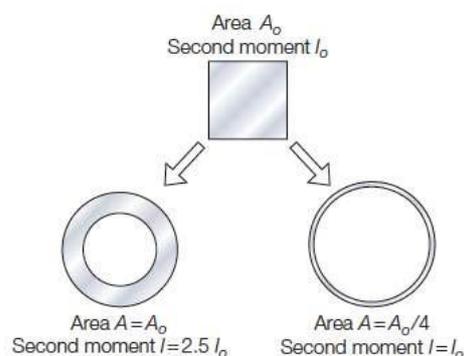
Setiap material memiliki modulus dan kekuatan, tetapi dapat dibuat lebih kaku dan lebih kuat ketika dibebani lentur maupun puntir dengan merekayasa bentuknya menjadi I-beam atau tabung berongga. Material ini juga dapat dibuat sedikit tidak kaku dengan membuatnya rata, seperti pegas daun datar atau bentuk kawat menjadi helix. Bentuk yang ditipiskan membantu menghilangkan panas.



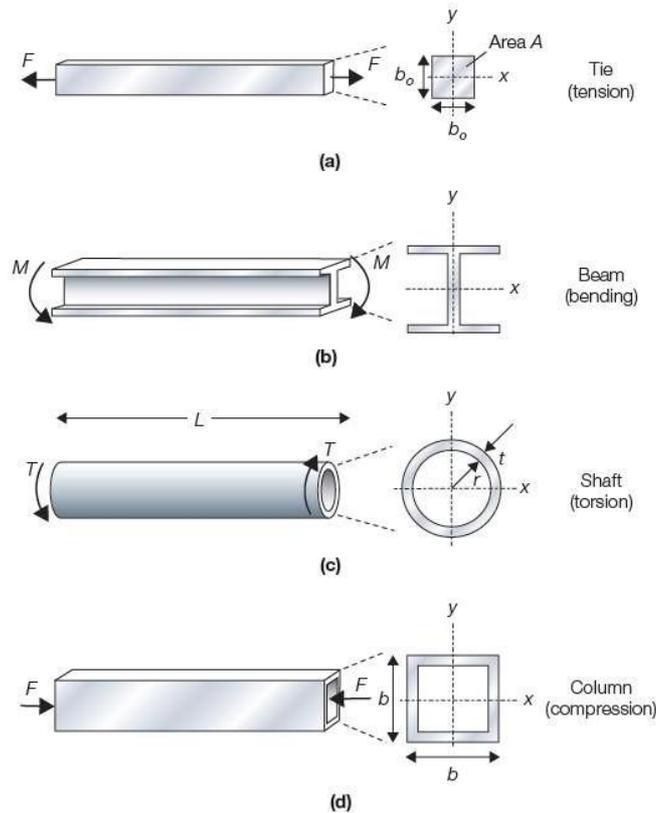
Gambar 10.1 Section shape is important for certain modes of loading

10.1 Faktor Bentuk

Beban pada komponen dapat diurai menjadi yang axial yang bekerja momen lentur dan torsi. Pengikat (*tie*) membawa beban tarik, balok membawa momen lentur, poros membawa torsi, kolom membawa beban axial kompresif. Gambar 10.3 menunjukkan mode pembebanan. Dalam tegangan aksial, luas penampang penting tetapi bentuknya tidak. Semua bagian dengan luas yang sama akan membawa beban yang sama. Tidak demikian pada beban lentur. Balok kotak berongga atau bentuk I lebih baik daripada balok padat pada luas penampang yang sama.



Gambar 10.2 Pengaruh bentuk penampang terhadap kekakuan lentur EI : penampang segiempat dibandingkan: kiri, bentuk tabung dengan luasan yang sama (tetapi lebih kaku 2.5X); kanan, bentuk tabung dengan kekakuan yang sama (tetapi lebih ringan 4X).



Gambar 10.3 Model pembebanan dan bentuk penampang yang dipilih untuk menahan beban: (a) tarik aksial, (b) lenturan, (c) puntiran, dan (d) tekan aksial, yang dapat menahan tekukan.

Untuk mencirikan ini diperlukan metric, yaitu suatu cara untuk mengukur efisiensi struktural bentuk bagian, terlepas dari material yang digunakannya. Metrik adalah rasio ϕ (phi) dari kekakuan atau kekuatan bagian berbentuk terhadap bentuk referensi "netral", misalnya persegi padat dengan luas penampang A yang sama.

Elastic Bending of Beam. Kekakuan lentur sebuah balok adalah proporsional terhadap EI , yang dinyatakan dengan persamaan:

$$S \propto \frac{EI}{L^3}$$

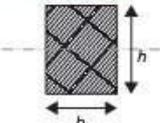
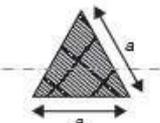
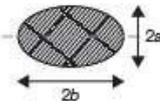
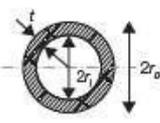
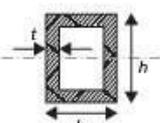
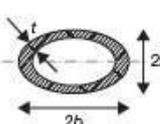
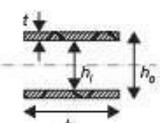
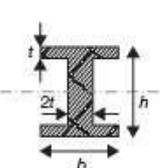
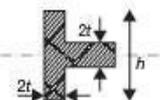
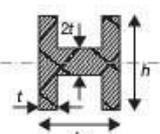
Nilai modulus Young E dan momen luasan kedua dengan panjang L di sekitar sumbu lentur (sumbu- x) dinyatakan dengan:

$$I = \int_{\text{section}} \gamma^2 dA$$

Dimana γ diukur dari sumbu lenturan dan dA adalah elemen luasan diferensial pada γ . Nilai I dan A dapat dilihat pada Tabel 10.2. Momen luasan kedua berbentuk segiempat dengan panjang sisi b_o maka:

$$I = \frac{1}{12} bh^3 = \frac{1}{12} b^4 = \frac{1}{12} A^2$$

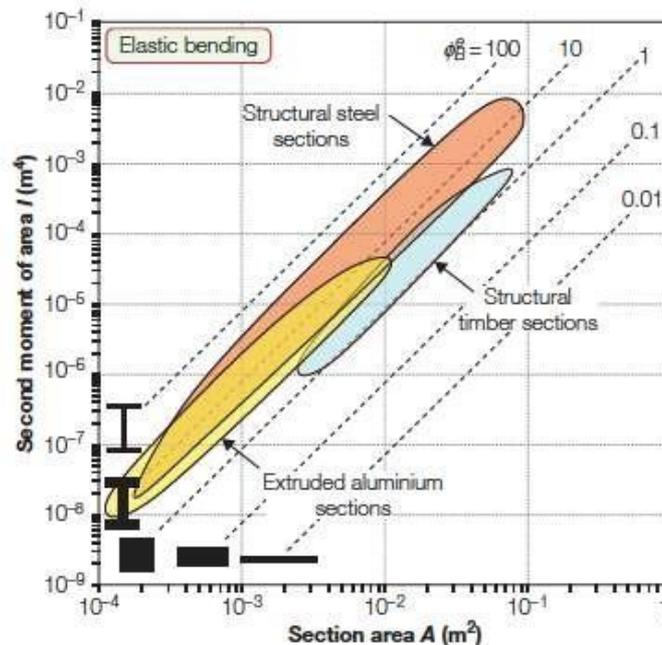
Table 9.2 Moments of Sections (with units)

Section Shape	Area A (m ²)	Moment I (m ⁴)	Moment K (m ⁴)	Moment Z (m ³)	Moment Q (m ³)
	bh	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^3}{3}$ $(1 - 0.58\frac{b}{h})$ $(h > b)$	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{b^2 h^2}{(3h + 1.8b)}$ $(h > b)$
	$\frac{\sqrt{3}}{4} a^2$	$\frac{a^4}{32\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{3}a^4}{80}$	$\frac{a^3}{32}$	$\frac{a^3}{20}$
	πr^2	$\frac{\pi}{4} r^4$	$\frac{\pi}{2} r^4$	$\frac{\pi}{4} r^3$	$\frac{\pi}{2} r^3$
	πab	$\frac{\pi}{4} a^3 b$	$\frac{\pi a^3 b^3}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{\pi}{4} a^2 b$	$\frac{\pi}{2} a^2 b$ $(a < b)$
	$\pi(r_o^2 - r_i^2)$ $\approx 2\pi r t$	$\frac{\pi}{4}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^3 t$	$\frac{\pi}{2}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^3 t$	$\frac{\pi}{4r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^2 t$	$\frac{\pi}{2r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^2 t$
	$2t(h+b)$ $(h, b \gg t)$	$\frac{1}{6} h^3 t (1 + 3\frac{b}{h})$	$\frac{2tb^2 h^2}{(h+b)} (1 - \frac{t}{h})^4$	$\frac{1}{3} h^2 t (1 + 3\frac{b}{h})$	$2tbh (1 - \frac{t}{h})^2$
	$\pi(a+b)t$ $(a, b \gg t)$	$\frac{\pi}{4} a^3 t (1 + \frac{3b}{a})$	$\frac{4\pi(ab)^{5/2} t}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{\pi}{4} a^2 t (1 + \frac{3b}{a})$	$2\pi t (a^3 b)^{1/2}$ $(b > a)$
	$b(h_o - h_i)$ $\approx 2bt$ $(h, b \gg t)$	$\frac{b}{12}(h_o^3 - h_i^3)$ $\approx \frac{1}{2} bth_o^2$	-	$\frac{b}{6h_o}(h_o^3 - h_i^3)$ $\approx bth_o$	-
	$2t(h+b)$ $(h, b \gg t)$	$\frac{1}{6} h^3 t (1 + 3\frac{b}{h})$	$\frac{2}{3} bt^3 (1 + 4\frac{b}{h})$	$\frac{1}{3} h^2 t (1 + 3\frac{b}{h})$	$\frac{2}{3} bt^2 (1 + 4\frac{b}{h})$
	$2t(h+b)$ $(h, b \gg t)$	$\frac{t}{6}(h^3 + 4bt^2)$	$\frac{t^3}{3}(8b+h)$	$\frac{t}{3h}(h^3 + 4bt^2)$	$\frac{t^2}{3}(8b+h)$
	$2t(h+b)$ $(h, b \gg t)$	$\frac{t}{6}(h^3 + 4bt^2)$	$\frac{2}{3} ht^3 (1 + 4\frac{b}{h})$	$\frac{t}{3h}(h^3 + 4bt^2)$	$\frac{2}{3} ht^2 (1 + 4\frac{b}{h})$

Kekakuan lentur dengan penampang berbentuk berbeda dari yang persegi dengan area A yang sama dengan faktor bentuk untuk lentur elastis ϕ_{f}^e adalah:

$$\phi_{\text{f}}^e = \frac{S}{S_0} = \frac{EI}{EI_0} = \frac{12I}{A^2}$$

Balok yang memiliki nilai $\phi_{\text{f}}^e = 50$ berarti kekakuannya 50X lebih besar jika dibandingkan dengan balok pejal pada bobot yang sama.



Gambar 10.4 Plot momen luasan kedua vs luasan penampang A. Struktur yang efisien memiliki nilai rasio I/A^2 yang tinggi.

Menghitung Faktor Bentuk.

Sebuah tabung dengan radius $r = 10$ mm dan tebal dindingnya $t = 1$ mm. Tentukan seberapa kaku jika dibandingkan dengan bentuk silinder padat pada massa per satuan panjang yang sama!

Jawab:

Factor bentuk dari Tabel 10.3 adalah:

$$\phi_B^e = \frac{3}{\pi} \left(\frac{r}{t} \right) = 10.55$$

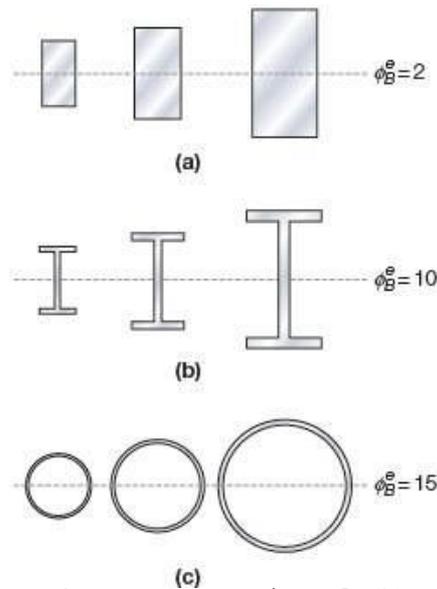
Dan untuk silinder padat, maka factor bentuknya adalah:

$$\phi_B^e = \frac{3}{\pi} = 0.955$$

Dengan demikian bentuk tabung memiliki kekakuan sebesar 10X jika dibandingkan dengan bentuk silinder pejal.

Puntir Elastis pada Poros

Bentuk penampang yang mampu menahan beban lentur dengan baik belum tentu bagus saat menerima pembebanan puntir.



Gambar 10.5 (a) Penampang segiempat dengan $\phi_{\frac{e}{\frac{h}{b}}} = 2$, (b) Penampang I dengan $\phi_{\frac{e}{\frac{h}{b}}} = 10$ dan (c) Tabung dengan $\phi_{\frac{e}{\frac{h}{b}}} = 15$

Perhatikan Gambar 10.4! Kekakuan poros adalah torsi T dibagi dengan sudut puntiran θ . Nilai ini proporsional terhadap GK , dimana G = modulus geser dan K = momen luasan torsional. Pada penampang bulat, K identic dengan dengan momen polar luasan J :

$$J = \int_{section} r^2 dA$$

dimana, dA adalah elemen luasan diferensial pada jarak radial r yang diukur dari pusat penampang benda. Untuk penampang non-sirkular, nilai K lebih kecil dari J yang didefinisikan sebagai sudut puntiran terhadap torsi T yaitu:

$$S_T = \frac{T}{\theta} = \frac{GK}{L}$$

dimana L = panjang poros. Nilai K dapat dilihat pada Tabel 10.2.

factor bentuk untuk puntiran elastis didefinisikan sebagai rasio antara kekakuan torsional dengan penampang tertentu terhadap poros segiempat pejal dengan panjang L dan luas penampang A yang sama.

$$\phi_T^e = \frac{S_T}{S_{T_o}} = \frac{K}{K_o}$$

Konstanta torsional K_o untuk penampang segiempat pejal (Tabel 10.2, barisan atas dengan $b = h$) adalah:

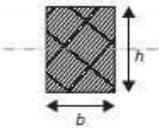
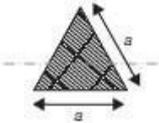
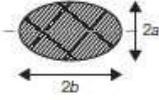
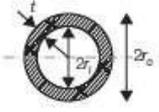
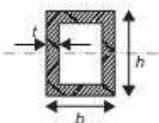
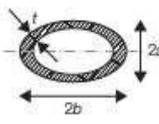
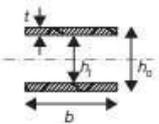
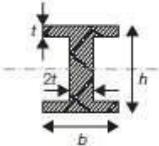
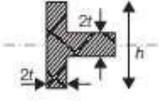
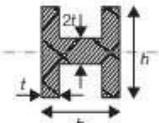
$$K_o = 0.14A^2$$

memberikan:

$$\phi_T^e = 7.14 \frac{K}{A^2}$$

Nilai 1 untuk penampang segiempat pejal, dan mendekati nilai 1 untuk bentuk pejal lainnya, tetapi untuk penampang ber dinding tipis khususnya tabung bisa lebih besar.

Table 9.3 Shape-efficiency Factors

Section Shape	Bending Factor ϕ_B^e	Torsional Factor ϕ_T^e	Bending Factor ϕ_B^f	Torsional Factor ϕ_T^f
	$\frac{h}{b}$	$\frac{2.38 \frac{h}{b}}{(1 - 0.58 \frac{b}{h})} (h > b)$	$(\frac{h}{b})^{0.5}$	$1.6 \sqrt{\frac{b}{h}} \frac{1}{(1 + 0.6 \frac{b}{h})} (h > b)$
	$\frac{2}{\sqrt{3}} = 1.15$	0.832	$\frac{3^{1/4}}{2} = 0.658$	0.83
	$\frac{3}{\pi} = 0.955$	1.14	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}} = 0.846$	1.35
	$\frac{3}{\pi} \frac{a}{b}$	$\frac{2.28 ab}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a}{b}}$	$1.35 \sqrt{\frac{a}{b}} (a < b)$
	$\frac{3}{\pi} (\frac{r}{t}) (r \gg t)$	$1.14 (\frac{r}{t})$	$\frac{3}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{r}{t}}$	$1.91 \sqrt{\frac{r}{t}}$
	$\frac{1}{2} \frac{h}{t} \frac{(1 + 3b/h)}{(1 + b/h)^2} (h, b \gg t)$	$\frac{3.57b^2 (1 - \frac{t}{h})^4}{th (1 + \frac{b}{h})^3}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + \frac{3b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$	$3.39 \sqrt{\frac{h^2}{bt}} \frac{1}{(1 + \frac{h}{b})^{3/2}}$
	$\frac{3}{\pi} \frac{a}{t} \frac{(1 + 3b/a)}{(1 + b/a)^2} (a, b \gg t)$	$\frac{9.12 (ab)^{5/2}}{t(a^2 + b^2)(a + b)^2}$	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a}{t}} \frac{(1 + \frac{3b}{a})}{(1 + \frac{b}{a})^{3/2}}$	$5.41 \sqrt{\frac{a}{t}} \frac{1}{(1 + \frac{a}{b})^{3/2}}$
	$\frac{3}{2} \frac{h_o^2}{bt} (h, b \gg t)$	-	$\frac{3}{\sqrt{2}} \frac{h_o}{\sqrt{bt}}$	-
	$\frac{1}{2} \frac{h}{t} \frac{(1 + 3b/h)}{(1 + b/h)^2} (h, b \gg t)$	$1.19 (\frac{t}{b}) \frac{(1 + \frac{4h}{b})}{(1 + \frac{h}{b})^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + \frac{3b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$	$1.13 \sqrt{\frac{t}{b}} \frac{(1 + \frac{4h}{b})}{(1 + \frac{h}{b})^{3/2}}$
	$\frac{1}{2} \frac{h}{t} \frac{(1 + 4bt^2/h^3)}{(1 + b/h)^2} (h, bt)$	$0.595 (\frac{t}{h}) \frac{(1 + \frac{8b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^2}$	$\frac{3}{4} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + \frac{4bt^2}{h^3})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$	$0.565 \sqrt{\frac{t}{h}} \frac{(1 + \frac{8b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$
	$\frac{1}{2} \frac{h}{t} \frac{(1 + 4bt^2/h^3)}{(1 + b/h)^2} (h, b \gg t)$	$1.19 (\frac{t}{h}) \frac{(1 + \frac{4b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^2}$	$\frac{3}{4} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + \frac{4bt^2}{h^3})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$	$1.13 \sqrt{\frac{t}{h}} \frac{(1 + \frac{4b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$

Kegagalan dalam Lenturan. Plastisitas selalu dimulai dengan tegangan ketika mencapai kekuatan luluhnya. Perpatahan terjadi ketika tegangannya sudah melampaui kekuatan patahnya. Kegagalan leleh terjadi jika melebihi batas ketahanannya. Tegangan gagal (σ_f) adalah tegangan lokal yang menyebabkan kegagalan luluh, patah atau leleh.

Dalam pembebanan lentur, tegangan terbesar terjadi pada γ_m pada permukaan balok yang terjauh dari sumbu netralnya dengan nilai:

$$\sigma = \frac{M\gamma_m}{I} = \frac{M}{Z}$$

dimana M = momen lentur. Kegagalan terjadi ketika tegangan sudah melebihi σ_f . Modulus penampang dirumuskan:

$$Z = \frac{I}{\gamma_m}$$

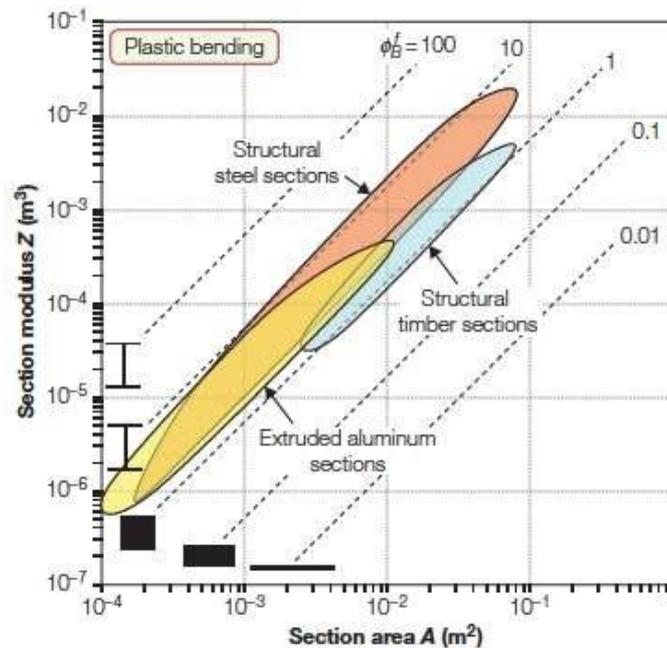
Efisiensi kekuatan dengan balok bentuk tertentu diukur dengan menggunakan rasio Z/Z_o , dimana Z_o adalah modulus penampang balok referensi dengan luas penampang A yang sama:

$$Z = \frac{b^3}{6} = \frac{A^{\frac{3}{2}}}{6}$$

kemudian:

$$\phi_B^f = \frac{Z}{Z_o} = \frac{6Z}{A^{\frac{3}{2}}}$$

Nilai $\phi_B^f = 1$ menyatakan balok referensi dengan penampang persegi. Pernyataan ϕ_B^f untuk bentuk lain pada Tabel 10.3 diturunkan dari modulus penampang Z pada Tabel 10.2. Sebuah balok dengan kegagalan factor efisiensi bentuk 10 berarti 10X lebih kuat dalam menerima beban lentur dibandingkan dengan penampang persegiempat pada bobot yang sama.



Gambar 10.6 Plot modulus penampang Z vs luas penampang A. struktur yang efisien memiliki nilai rasio $Z/A^{3/2}$ yang tinggi.

Evaluasi Faktor Bentuk

Sebuah balok memiliki penampang kotak persegiempat dengan ketinggian $h = 100 \text{ mm}$, lebar $= 100 \text{ mm}$ dan ketebalan dinding $t = 5 \text{ mm}$. tentukan factor bentuk ϕ_B^f

Jawab:

Factor bentuk untuk penampang kotak berdasarkan Tabel 10.3 adalah:

$$\phi_B^f = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{t \left(1 + \frac{3b}{h}\right)} \left(1 + \frac{b}{h}\right)^{\frac{3}{2}} = 4.47$$

Penampang kotak adalah lebih kuat daripada balok dengan penampang segiempat pejal pada massa per satuan panjang yang sama sebesar 4.47.

Kegagalan dalam Torsi. Persoalan dalam torsional akan lebih kompleks. Untuk batang bulat atau tabung yang dibebani torsi T , tegangan geser τ mencapai maksimum pada permukaan paling luar.

$$\tau = \frac{Tr_m}{J}$$

Nilai J/r_m dalam puntiran memiliki ciri yang sama dengan I/γ_m dalam lenturan. Untuk penampang non-sirkular dengan ujungnya bebas, tegangan permukaan maksimum adalah:

$$\tau = \frac{T}{Q}$$

dimana Q menggunakan satuan m^3 memiliki peran penting dalam torsional sebagaimana Z dalam lenturan. Kegagalan dalam torsional adalah:

$$\phi_T^f = \frac{Q}{Q_o} = 4.8 \frac{Q}{A^{\frac{3}{2}}}$$

Nilai Q dan ϕ_T^f terdapat pada Tabel 10.2 dan 10.3. poros dengan penampang pejal memiliki nilai $\phi_T^f = 1$.

Pembebanan Aksial: Tekukan Kolom. Sebuah kolom dengan panjang L dibebani kompresi mengalami tekukan secara elastis ketika beban melebihi beban Euler, yaitu:

$$F_c = \frac{n^2 \pi^2 EI_{\min}}{L^2}$$

Meningkatkan Kekuatan dengan Pembentukan.

Sebuah kolom silindris dan ramping dengan tinggi L menahan beban F . Jika overload, kolom gagal karena tekukan elastis. Berapa kapasitas beban jika silinder padat diganti dengan tabung bulat berlubang pada luas penampang A yang sama.

Jawab:

Mengganti I_{\min} dengan $\phi_B^e A^2/12$ maka diperoleh:

$$F_c = \frac{n^2 \pi^2 A^2}{12L^2} E \phi_B^e$$

Beban gagal meningkat seiring dengan rasio factor bentuk tabung terhadap factor bentuk silindris pejal. Factor bentuk tabung berdinding tipis adalah:

$$\phi_B^e = \frac{3r}{\pi t}$$

Sedangkan untuk silindris pejal adalah:

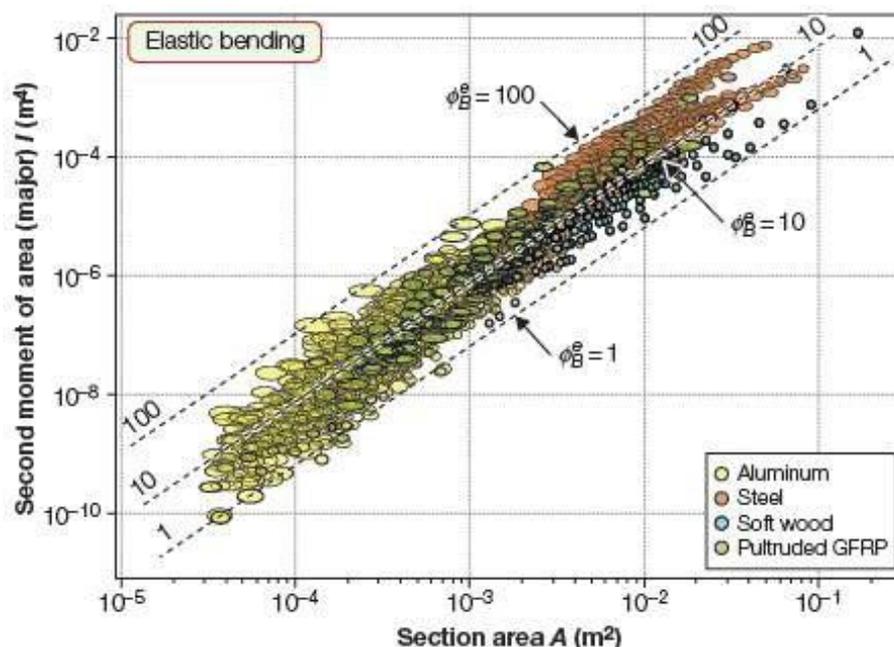
$$\phi_B^e = \frac{3}{\pi}$$

10.2 Keterbatasan Efisiensi Bentuk

Untuk membuat struktur yang kaku dan kuat dengan material sedikit maka faktor efisiensi bentuk dibuat sebesar mungkin. Semakin besar nilai ϕ baik, tetapi ada batasannya. Untuk mengeksplorasi batasan ini digunakan dengan dua cara. Yang pertama adalah empiris: dengan memeriksa bentuk dalam material nyata. Yang kedua adalah dengan analisis stabilitas mekanis penampang berbentuk.

Bagian standar untuk balok, poros, dan kolom umumnya prismatic. Bentuk prismatic mudah dibuat dengan rolling, ekstrusi, drawing, pultrusi, atau sawing. Penampang ini dapat berbentuk solid, berongga tertutup (seperti tabung atau kotak), atau open-hollow (I, U, atau L). Gambar 10.8 memperlihatkan nilai untuk I dan A untuk 1.880 bagian standar yang terbuat dari keempat bahan ini (baja struktural, paduan aluminium ekstrusi, GFRP pultruded, dan kayu structural) dengan kontur faktor bentuk.

Beberapa penampang memiliki $\phi_B^e = 1$ adalah penampang silindris padat atau persegi. Yang lebih menarik adalah bahwa tidak ada yang memiliki nilai $\phi_B^e > 65$. Plot serupa untuk Z dan A (Gambar 10.6) menunjukkan batas atas untuk ϕ_B^e sekitar 15.

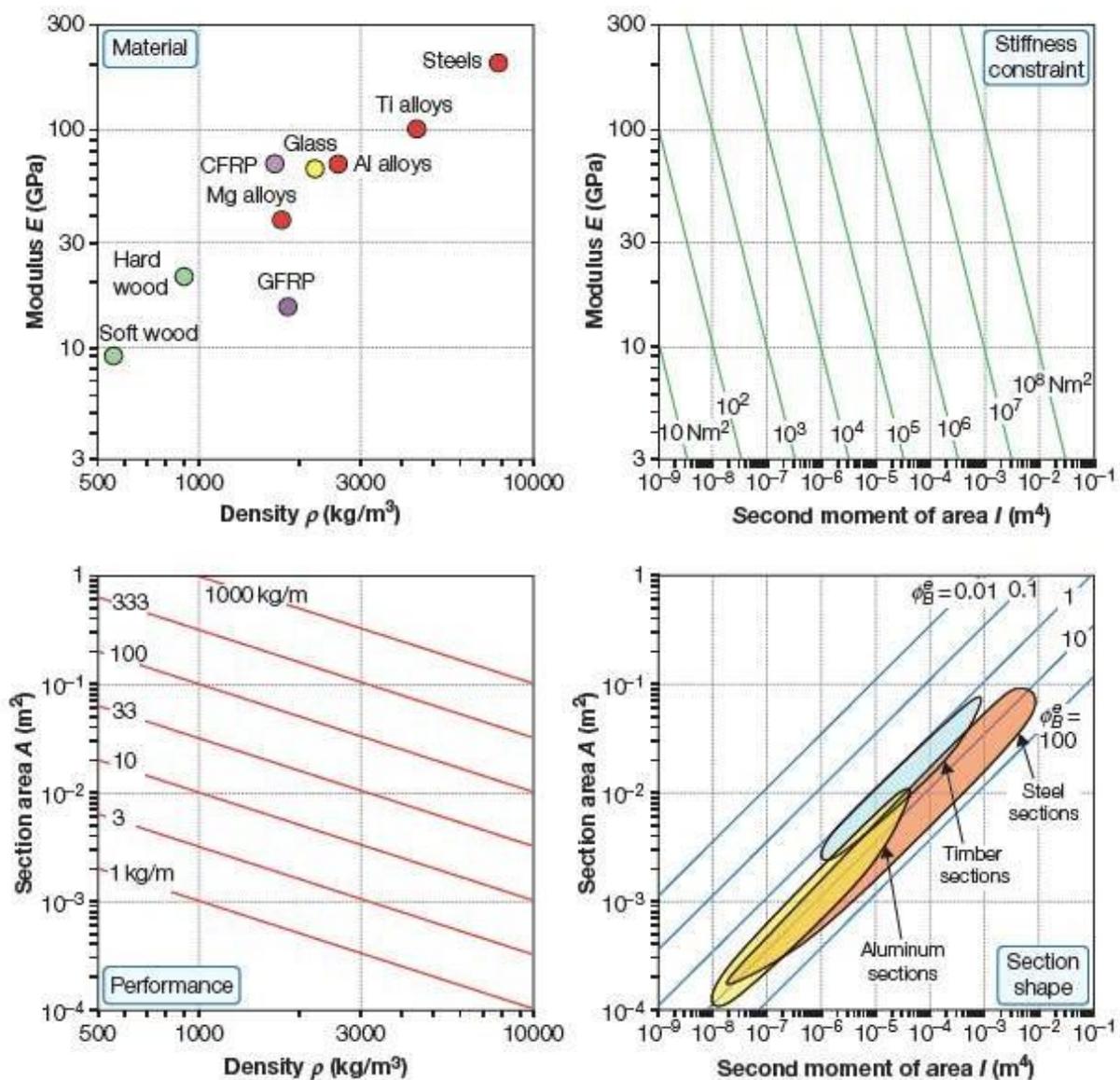


Gambar 10.7 Plot log (I) vs log (A) untuk penampang standar pada baja, aluminium, GFRP dan kayu.

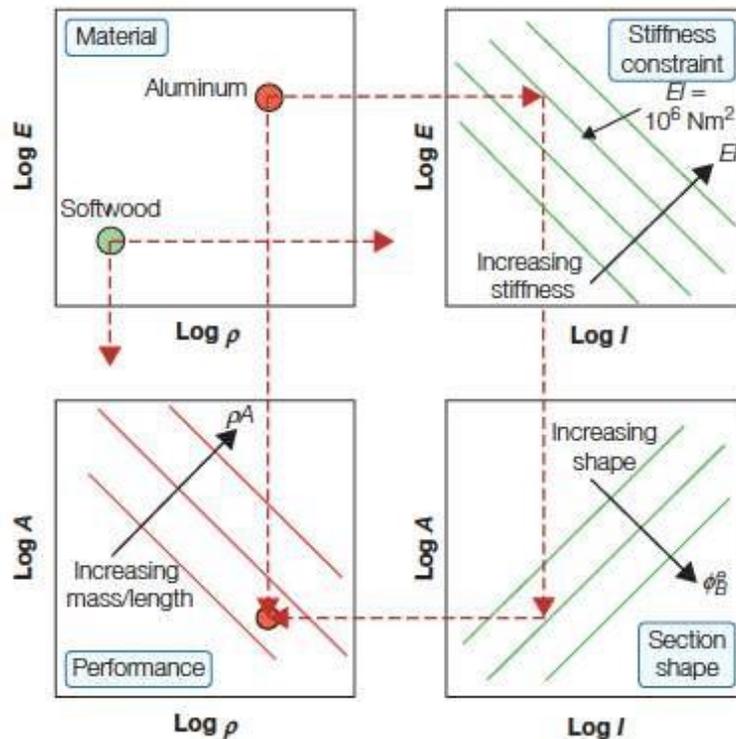
Batasan atas untuk efisiensi bentuk merupakan masalah penting untuk menjadi pusat desain struktur yang ringan atau biaya. Salah satu penjelasan yang umum adalah kesulitan manufaktur sebagai batasan manufaktur. Baja memiliki faktor bentuk hingga 50.

10.3 Eksplorasi Kombinasi Material-Bentuk

Gambar 10.8 kedua grafik ditempatkan di sudut-sudut yang berlawanan dari persegi. Diagram sifat material berada di kiri atas. Diagram efisiensi bentuk berada di kanan bawah, dengan sumbunya dipertukarkan sehingga I berada di sepanjang bagian bawah dan A berada di samping. Daerah yang diarsir di atasnya menunjukkan daerah populasi. Di kanan atas memiliki sumbu E dan I , garis diagonal menunjukkan kekakuan lentur penampang EI . Di kiri bawah memiliki sumbu A dan ρ , kontur diagonal menunjukkan metrik kinerja: massa per satuan panjang, $m_l = \rho A$.



Gambar 10.8 Penyusunan diagram 4 kuadran untuk menjelajahi penampang struktural untuk desain kekakuan terbatas selama pembebanan lentur.

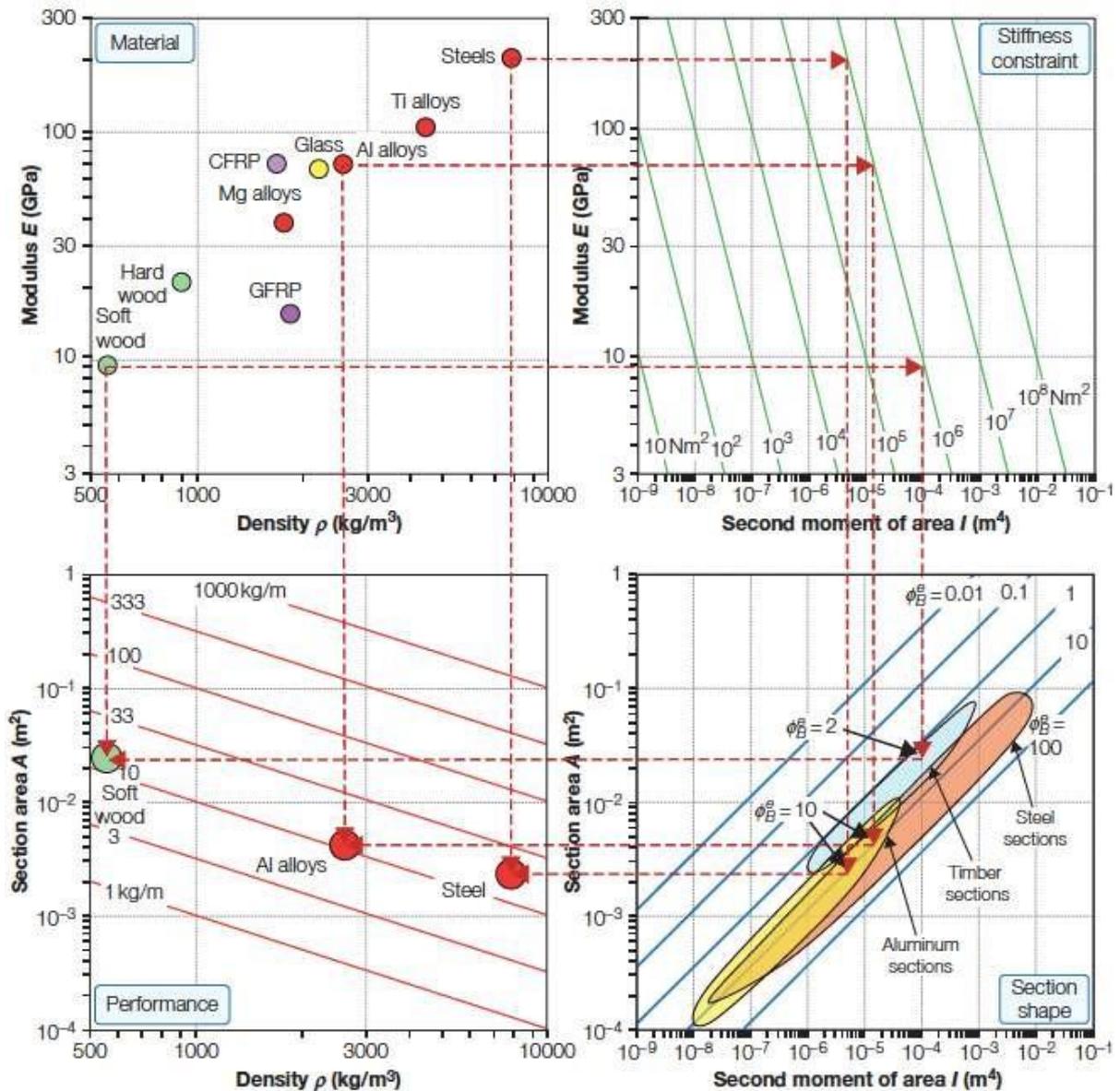


Gambar 10.9 Skema yang menunjukkan bagaimana menggunakan diagram 4 kuadran

Dengan menggunakan kumpulan diagram ini maka memungkinkan untuk melakukan penilaian dan perbandingan pada penampang yang dibatasi kekakuan.

1. Pilih material untuk penampang tersebut dan tandai modulus E dan ρ ke diagram sifat material di kuadran pertama dari gambar.
2. Pilih kekakuan penampang yang diinginkan (EI). Ini adalah batasan yang harus dipenuhi oleh penampang. Memperluas garis horizontal dari nilai E untuk bahan ke kontur yang sesuai dalam grafik batasan kekakuan di kuadran kedua.
3. Jatuhkan vertikal dari titik ini ke bagan bentuk penampang di kuadran ketiga ke garis yang menggambarkan faktor bentuk untuk bagian tersebut. Nilai I dan A di luar pita berbayang dilarang.
4. Perluas garis horizontal dari titik ini ke grafik kinerja di kuadran akhir. Jatuhkan vertikal dari titik ρ material di bagan material. Persimpangan menunjukkan massa per satuan panjang bagian.

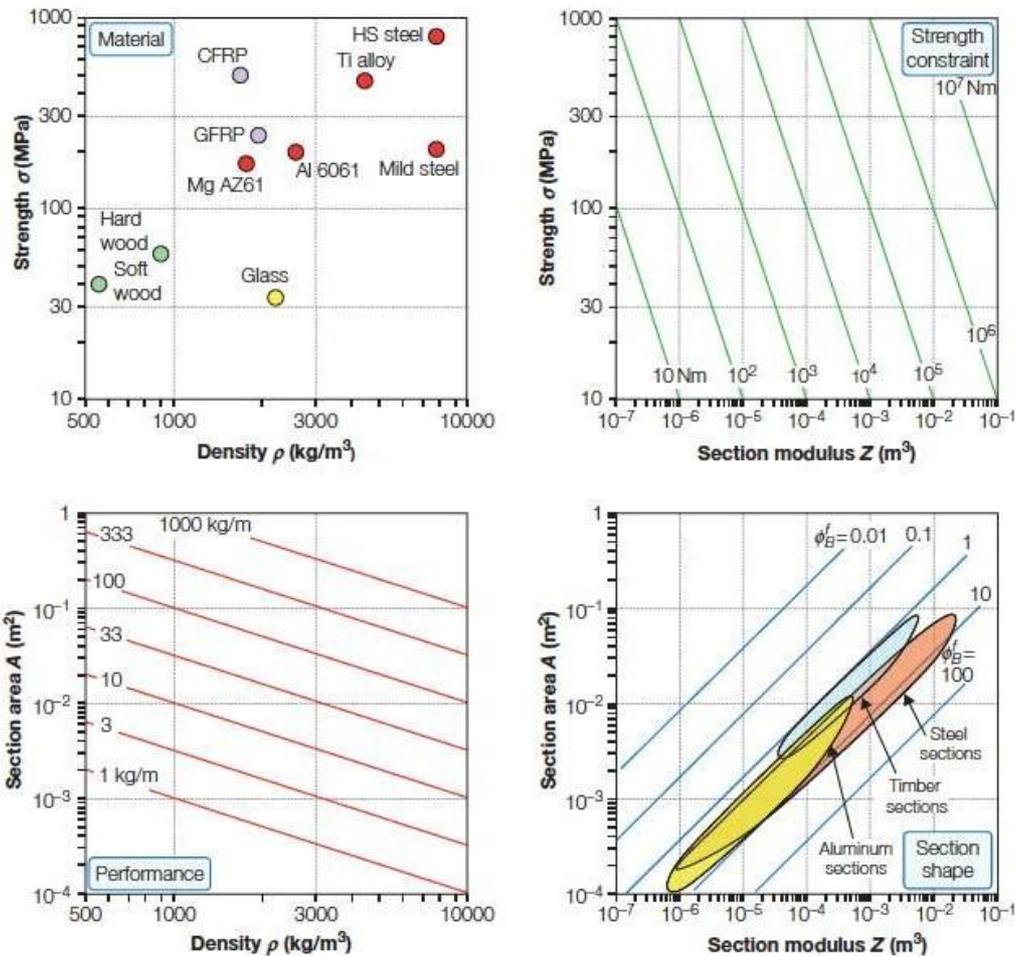
Contoh pada Gambar 10.10 adalah membandingkan massa baja roll dan aluminium ekstrusi dengan $\phi_B^e = 10$, dan kayu $\phi_B^e = 2$ dengan batasan kekakuan lentur 10^6 N.m^2 . Penampang aluminium ekstrusi memiliki bobot paling ringan. Balok baja berbentuk efisien hampir sama ringannya untuk kekakuan lentur yang diberikan, seperti yang terbuat dari kayu, meskipun kepadatan baja 12 kali lebih besar daripada kayu. Hal ini karena faktor bentuk yang lebih tinggi mungkin dengan baja.



Gambar 10.10 Perbandingan baja, aluminum, dan kayu pada desain kekakuan terbatas dengan $EI = 10^6 \text{ Nm}^2$. Aluminum dengan massa 10kg/m , dan baja 3X lebih berat.

Strength-limited Design. Gambar 10.11 menunjukkan properti material kepadatan $\sigma_f - \rho$ yang ditempatkan di kiri atas. Daigram bentuk Z-A berada di kanan bawah. Grafik batasan kekuatan di kanan atas memiliki sumbu σ_f dan Z. Garis diagonal menunjukkan kekuatan lentur penampang, $Z\sigma_f$. Diagram kinerja di kiri bawah memiliki sumbu yang sama seperti sebelumnya, A dan ρ dan kontur diagonal kembali menunjukkan metrik kinerja. Massa per satuan panjang $m_l = \rho A$.

Ini digunakan dengan cara yang sama seperti itu untuk desain terbatas kekakuan. Misalnya untuk baja dengan $\phi_B^e = 15$, aluminium $\phi_B^e = 10$, dan GFRP $\phi_B^e = 5$ untuk momen kegagalan yang diperlukan $Z\sigma_f = 10^4 \text{ N.m}$. GFRP menawarkan bobot yang paling ringan.



Gambar 10.11 Susunan diagram 4 kuadran untuk penampang stuktur pada desain kekuatan terbatas.

10.4 Indeks Material Yang Mencakup Bentuk

Gambar 10.8 dan 10.11 menghubungkan material, bentuk, batasan, dan tujuan kinerja dalam grafis.

Lentur Elastis pada Balok. Pemilihan material untuk balok kekakuan lentur yang ditentukan S_B^* dan panjang L (batasan), untuk memiliki massa minimum m (tujuan). Massa m dari balok dengan panjang L dan luas penampang A diberikan, maka:

$$m = AL\rho$$

Kekakuan lentur adalah:

$$S_B = C_1 \frac{EI}{L^3}$$

dimana C_1 adalah konstanta yang hanya tergantung pada cara beban didistribusikan pada balok.

$$S_B = \frac{C_1 EI}{12 L^3} \phi_B^e A^2$$

Dengan mengeliminasi A dan mensubstitusikan S_B^* maka diperoleh massa balok adalah:

$$m = \left(\frac{12S_B^*}{C_1} \right)^{1/2} L^{5/2} \left[\frac{\rho}{(\Phi_B^e E)^{1/2}} \right]$$

Semua yang ada dalam persamaan ini ditentukan kecuali istilah dalam kurung siku, dan ini hanya tergantung pada material dan bentuk. Untuk balok dengan bentuk yang sama, pilihan terbaik adalah material dengan nilai terbesar $E^{1/2}/\rho$. Tetapi jika menginginkan kombinasi bentuk material yang paling ringan, maka dengan nilai indeks terbesar.

$$M_1 = \frac{(\Phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$$

Puntiran Elastis pada Poros. Prosedur untuk puntiran elastis pada poros sama dengan pada lenturan. Poros dengan luas penampang A dan panjang L dikenakan torsi T menyebabkan sudut θ . Kekakuan torsional:

$$S_T = \frac{T}{\theta} = \frac{G}{7.14L} \Phi^e A^2$$

$$m = \left(7.14 \frac{S_T^*}{L^3} \right)^{1/2} L^{3/2} \left[\frac{\rho}{(\Phi_T^e G)^{1/2}} \right]$$

Kombinasi terbaik material-bentuk adalah satu dari nilai terbesar:

$$\frac{(\Phi_T^e G)^{1/2}}{\rho}$$

Untuk tujuan praktis $G = 3E/8$, sehingga indeks menjadi:

$$M_2 = \frac{(\Phi_T^e E)^{1/2}}{\rho}$$

Untuk poros dengan bentuk yang sama, mengurangi menjadi $E^{1/2}/\rho$. Ketika poros berbeda dalam bahan dan bentuk, indeks material dapat digunakan.

$$\Phi_B^e = \frac{12S_B L^5}{C_1 m^2} \left[\frac{\rho^2}{E} \right]$$

Jika massa struktur, panjang, dan kekakuan lenturnya diketahui dan kepadatan dan modulus bahan yang dibuat diketahui, maka faktor bentuk dapat dihitung. Untuk rentang jembatan yang ada, ini memberikan nilai antara 50 dan 200.

Peningkatan Efisiensi Melalui Bentuk

Material dibentuk diperlukan untuk balok kaku dengan massa minimum. Empat bahan tersedia dengan sifat dan bentuk khas yang tercantum dalam Tabel 10.5. Kombinasi bentuk material mana yang memiliki massa terendah untuk kekakuan tertentu?

Jawaban:

Tabel 10.5 Pemilihan material dan bentuk pada balok kaku, ringan					
Material	ρ (Mg/m ³)	E (GPa)	Φ_B^e	$E^{1/2}/\rho$	$(\Phi_B^e E)^{1/2}/\rho$
1020 steel	7.85	205	20	1.8	8.2
6061-T4 Al	2.7	70	15	3.1	12.0
GFRP (isotropic)	1.75	28	8	2.9	8.5
Wood (Oak)	0.9	13.5	2	4.1	5.8

Kolom kedua hingga terakhir pada tabel menunjukkan indeks "bentuk tetap" $E^{1/2}/\rho$. Kayu memiliki nilai terbesar, lebih dari dua kali lipat dari baja. Tetapi ketika setiap bahan dibentuk secara efisien (kolom terakhir), kayu memiliki nilai terendah M_1 , bahkan baja lebih baik; paduan aluminium menang, melampaui baja dan GFRP.

Kegagalan Balok dan Poros. Balok dengan panjang L dibebani lentur harus mampu menahan beban F tanpa mengalami kegagalan dan seringan mungkin. Kegagalan terjadi jika momen melebihi:

$$M = Z\sigma_f$$

Dimana Z = modulus penampang dan σ_f = tegangan dimana kegagalan terjadi. Dengan demikian maka:

$$M = \frac{\sigma_f}{6} \frac{\phi^f A^{3/2}}{B}$$

Dengan substitusi maka massa balok adalah:

$$m = (6M)^{2/3} L \left[\frac{\rho^{3/2}}{\phi_B^f \sigma_f} \right]^{2/3}$$

Kombinasi terbaik material-bentuk adalah yang memiliki nilai indeks terbesar, yaitu:

$$M_3 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$$

Analisis yang sama untuk kegagalan torsional adalah:

$$M_4 = \frac{(\phi_T^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$$

Pemilihan Material dan Kombinasi Bentuk

Material dengan bentuk tertentu diperlukan untuk aplikasi balok yang kuat tetapi ringan. 4 material tersedia dalam Tabel 10.6. Manakah kombinasi yang dapat memenuhi massa terkecil pada kekuatan lentur yang sama?

Jawab:

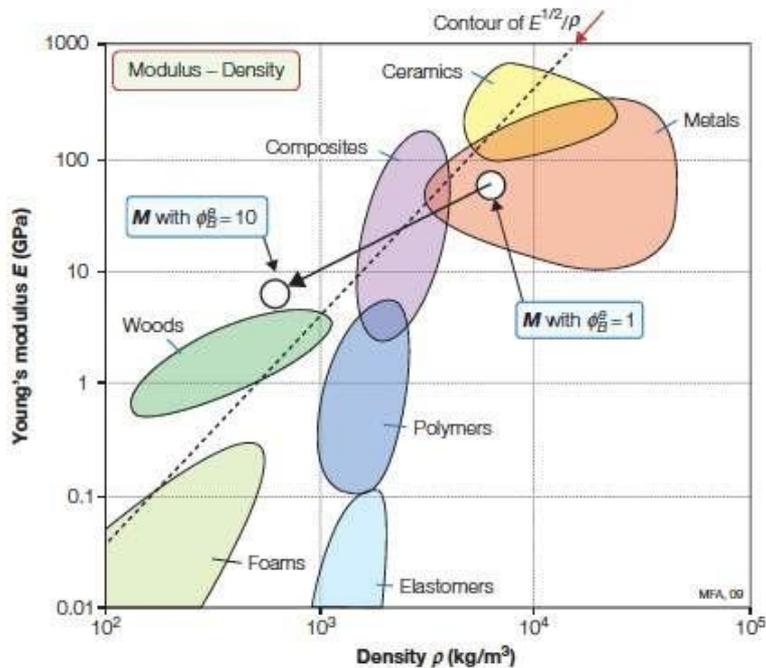
Kolom kedua terakhir pada table menunjukkan indeks "fixed-shape" yang sederhana yaitu $\sigma_f^{2/3}/\rho$. Kayu memiliki nilai tertinggi, 3X lebih tinggi dari baja. Tetapi ketika masing-masing material dibentuk (kolom terakhir) paduan aluminium yang paling memenuhi, melebihi baja dan GFRP.

Material	ρ (Mg/m ³)	σ_f (MPa)	ϕ_B^f	$\sigma_f^{2/3}/\rho$	$\frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
1020 steel	7.85	330	5	6.1	17.8
6061-T4 Al	2.7	110	4	8.5	21.4
GFRP SMC (isotropic)	2.0	80	3	10.3	110.3
Wood (oak), along grain	0.9	50	1.5	15	110.7

10.5 Grafik Bantu Pemilihan Menggunakan Indeks

Material dengan bentuk tertentu dapat diplot ke diagram sifat material. Semua kriteria seleksi masih berlaku. Indeks material untuk lenturan elastis dapat ditulis ulang sebagai:

$$M_1 = \frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho} = \frac{(E/\phi_B^e)^{1/2}}{\rho/\phi_B^e} = \frac{E^{*1/2}}{\rho^*}$$



Gambar 10.12 Material yang memiliki sifat baru dengan modulus $E^* = E/\phi_B^e$ dan densitas $\rho = \rho/\phi_B^e$

Diagram $E - \rho$ ditampilkan secara skematis pada Gambar 10.12. Sifat bahan "baru" E^* dan ρ^* dapat diplot ke dalamnya. Memperkenalkan bentuk ($\phi_B^e = 10$) memindahkan material M ke kiri bawah di sepanjang garis kemiringan 1, dari posisi E, ρ ke posisi $E/10, \rho/10$ seperti yang ditunjukkan pada gambar. Kriteria pemilihan diplot ke gambar seperti sebelumnya: Nilai konstan indeks $E^{1/2}/\rho$, plot sebagai garis lurus kemiringan 2 yang ditampilkan sebagai garis patah-patah. Pengenalan bentuk telah memindahkan material dari posisi di bawah garis ini ke garis lain di atas, kinerjanya telah meningkat.

Pemilihan material berdasarkan kekuatan pada berat minimum menggunakan prosedur yang sama. Indeks material untuk kegagalan dalam lenturan adalah:

$$M_4 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho} = \frac{(\sigma_f / (\phi_B^f)^2)^{2/3}}{\rho / (\phi_B^f)^2} = \frac{\sigma_f^{*2/3}}{\rho^*}$$

Material dengan kekuatan σ_f dan kepadatan ρ , ketika dibentuk berperilaku lenturan seperti material baru, kekuatan dan kepadatan:

$$\sigma_f^* = \frac{\sigma_f}{(\phi_B^f)^2}; \quad \rho^* = \frac{\rho}{(\phi_B^f)^2}$$

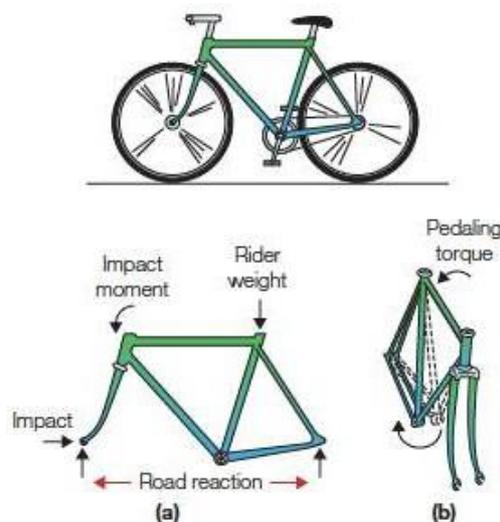
10.6 Studi Kasus

Indeks yang mencakup bentuk menyediakan alat untuk mengoptimalkan pemilihan bahan dan bentuk. Tabel 10.7 adalah prosedur pemilihan, pertama harus mengidentifikasi material kandidat dan bentuk penampang di mana masing-masing tersedia atau dapat dibuat. Sifat material yang relevan dan faktor bentuk untuk masing-masing ditabulasi dan indeks yang relevan dievaluasi. Kombinasi terbaik dari bahan dan bentuk adalah bahwa dengan nilai terbesar indeks. Informasi yang sama dapat diplot pada bagan pemilihan material.

Tabel 10.7 Indices with shape: stiffness- and strength-limited Design at minimum weight		
Component shape, Loading, and Constraints	Stiffness-limited Design	Strength-limited Design
Tie (tensile member) Load, stiffness, and length specified, section-area free	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$
Beam (loading in bending) Loaded externally or by self-weight, stiffness, strength, and length specified, section area and shape free	$\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
Torsion bar or tube Loaded externally, stiffness, strength, and length specified, section area and shape free	$\frac{(\phi_T^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_T^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
Column (compression strut) Collapse load by buckling or plastic crushing, strength and length specified, section area and shape free	$\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$

Studi Kasus: Garpu untuk Sepeda Balap

Pertimbangan pertama dalam desain sepeda (Gambar 10.13) adalah kekuatan. Kekakuan penting, tetapi kriteria desain awal adalah bahwa bingkai dan garpu tidak boleh patah saat digunakan. Pembebanan pada garpu didominasi oleh lenturan. Jika sepeda untuk balapan, massa adalah pertimbangan utama: Garpu harus se-ringan mungkin. Apa pilihan bahan dan bentuk terbaik?



Gambar 10.13 Sepeda dengan garpu yang dibebani lenturan. Garpu dengan bobot paling ringan tanpa mengalami kegagalan secara plastis

Design Requirement. Rumusan kebutuhan desain garpu untuk sepeda balap dapat dinyatakan seperti pada Tabel 10.8 di bawah.

Tabel 10.8 Design requirement for bicycle forks	
Function	Bicycle forks
Constraints	Must not fail under design loads, a strength constraint Length specified
Objective	Minimize mass
Free variable	Choice of material Section shape

Translasi dan pemilihan. Garpu dimodelkan sebagai balok panjang L yang harus membawa beban maksimum P tanpa mengalami plastis atau patah (Tabel 10.8). Garpunya tubular, radius r dan ketebalan dinding t sudah ditentukan. Massa harus diminimalkan agar ringan tetapi kuat, balok yang kuat. Material dan bentuk terbaik dari Tabel 10.7 adalah bahwa dengan nilai terbesar:

$$M_2 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$$

Tabel 10.9 mencantumkan tujuh material kandidat dengan properti sifat-sifatnya. Jika garpu padat, yang berarti bahwa $\phi_B^f = 1$, maka pohon cemara yang paling baik. Bambu sangat istimewa karena berupa tabung berongga dengan faktor bentuk makroskopis $\phi_B^f = 2.2$ yang memberikan kekuatan lentur yang jauh lebih tinggi daripada pohon cemara padat (kolom terakhir). Jika bentuk ditambahkan ke material lain, maka peringkat berubah.

Faktor bentuk yang tercantum dalam tabel dapat dicapai menggunakan metode produksi normal. Baja bagus. Titanium 6-4 lebih baik. Yang terbaik dari semuanya adalah CFRP. Densitas magnesium rendah, tetapi kurang aplikatif karena kekuatannya terbatas.

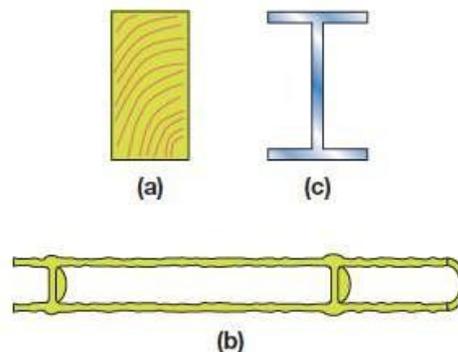
Tabel 10.9 Material untuk garpu sepeda					
Material	Strength σ_f (MPa)	Density ρ (kg/m ³)	Shape factor ϕ_B	Index* $\sigma_f^{2/3}/\rho$ (MPa) ^{2/3} /(Mg/m ³)	Index M_2 $\frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$ (MPa) ^{2/3} (mg/m ³)
Spruce (Norwegia)	75	450	1.5	39	51
Bamboo	70	700	2.2	24	41
Steel (Reynolds 531)	880	7850	7.5	12	46
Aluminum (6061-T6)	250	2700	5.9	15	49
Titanium 6%Al-4%V	950	4420	5.9	22	72
Magnesium AZ 61	165	1810	4.25	17	45
CFRP	375	1550	4.25	33	87

Postscript Sepeda awal terbuat dari kayu, sepeda balap dari baja, aluminium, atau CFRP. Kadang-kadang terbuat dari serat karbon yang memiliki lapisan kaca atau Kevlar untuk meningkatkan ketahanan patah. Sepeda gunung dengan kekuatan dan ketahanan benturannya sangat penting, maka dipilih garpu baja atau titanium.

Floor Joists: Wood, Bamboo, or Steel?

Lantai didukung pada joist: balok yang membentang di antara dinding-dinding. Joist diperlukan untuk mendukung beban lentur yang ditentukan tanpa kendur secara berlebihan atau gagal. Harganya harus murah.

Secara tradisional, joist di Amerika Serikat dan Eropa terbuat dari kayu dengan penampang persegi panjang dengan rasio aspek 2:1. Dari Tabel 10.3 diperoleh faktor bentuk elastis $\phi_B^e = 2$. Di negara-negara Asia bambu, dengan faktor bentuk $\phi_B^e = 3.2$ adalah pengganti kayu di bangunan yang lebih kecil. Tetapi ketika kayu menjadi langka dan bangunan perlu lebih besar, baja menggantikan kayu dan bambu sebagai bahan struktural utama.



Gambar 10.14 Luas penampang balok kayu ($\phi_B^e = 2$), balok baja I ($\phi_B^e = 10$) dan bamboo (factor bentuk alami $\phi_B^e = 3.2$)

Joist penampang I dari baja standar memiliki faktor bentuk dalam rentang $5 < \phi_B^e < 25$. Apakah I-joists baja adalah pilihan yang lebih baik daripada yang kayu? Persyaratan desain ditunjukkan pada Tabel 10.10.

Tabel 10.10 Persyaratan desain untuk floor joist	
Function	Floor joist
Constraints	Length specified Stiffness specified Strength specified
Objective	Minimum material cost
Free variable	Choice of material Selection shape

Translasi dan Pemilihan. Kekakuan adalah pertimbangan utama. Balok paling murah pada kekakuan yang ditentukan adalah yang memiliki nilai indeks terbesar dengan mengganti ρ dengan $C_{m\rho}$ menjadi biaya minimum:

$$M_1 = \frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{C_m \rho}$$

Data modulus E, kepadatan ρ , biaya material C_m , dan faktor bentuk ϕ_B^e dapat dilihat pada Tabel 10.11 bersamaan dengan nilai indeks M_1 dengan dan tanpa bentuk. Balok baja dengan $\phi_B^e = 25$ memiliki nilai M_1 yang sedikit lebih besar daripada kayu, yang berarti sedikit lebih murah untuk kekakuan yang sama.

Tapi bagaimana dengan kekuatan? Pilihan terbaik untuk sinar cahaya dari kekuatan yang ditentukan adalah yang memaksimalkan indeks material:

$$M_2 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{C_m \rho}$$

Kayu memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan baja balok I.

Material	Density ρ (kg/m ³)	Cost C_m US\$/kg	Flexural modulus E (GPa)	Flexural strength σ_f (MPa)
Wood (pine)	490	1.0	10.5	41
Bamboo	700	1.9	17	42
Steel (1020)	7850	0.65	205	355

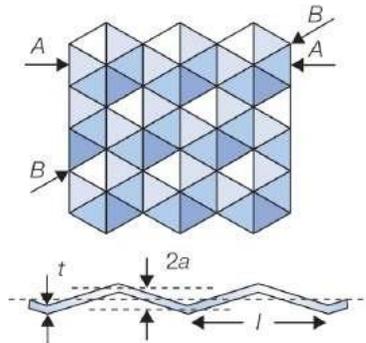
Material	Shape factor ϕ_B^e	Shape factor ϕ_B^f	Index $E^{1/2}/C_m \rho$	Index * M_1 $(\phi_B^e E)^{2/3}/C_m \rho$	Index $\sigma_f^{2/3}/C_m \rho$	Index M_2 $(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}/C_m \rho$
Wood (pine)	2	1.4	6.3	8.9	24	30
Bamboo	3.2	2	3.1	5.5	9	14
Steel (1020)	15	4	2.8	11	10.8	25

Postscript. Tidak banyak yang bisa dipilih antara kayu standar dan bagian baja standar yang digunakan untuk joist. Kayu dan bambu tumbuh di banyak negara, baja datang kemudian dengan biaya transportasi terkait. Merakit struktur kayu lebih mudah daripada merakit baja. Tetapi kayu adalah material variable yang rentan terhadap kerusakan waktu, dimangsa jamur, serangga, dan mamalia kecil dengan gigi tajam. Untuk gedung komersial besar, maka baja adalah pilihan terbaik.

Meningkatkan Kekakuan Lembaran Baja

Struktur lembaran baja dapat dibuat lebih kaku dan lebih ringan agar mampu menahan beban kompresi tanpa mengalami tekukan dan untuk meningkatkan frekuensi getaran alaminya. Kekakuan lentur sebanding dengan EI (E adalah modulus Young, I adalah momen luasan kedua). Nilai I setara dengan $t^3/12$ per satuan lebar, di mana t adalah ketebalan lembaran. Untuk mengubah kekakuan maka dapat dilakukan dengan menambahkan sedikit bentuk, meningkatkan I.

Translasi dan Pemilihan. Cara lama untuk membuat lembaran baja menjadi lebih kaku adalah membuat bergelombang (*corrugate*), memberikan profil sinusoidal. Korugasi meningkatkan momen luasan kedua lembaran di sekita sumbu normal dalam korrugasi itu sendiri. Resistensi terhadap lenturan dalam satu arah dapat meningkat, tetapi di semua arah.



Gambar 10.15 Lembaran dengan profil dimple heksagonal saling bersebelahan untuk meningkatkan kekakuan lentur dan kekuatan.

Tabel 10.13 Design requirement for stiffened steel sheet	
Function	Steel sheet for stiffness-limited structure
Constraint	Profile limited to a maximum deviation 5X ketebalan lembaran dari datarnya
	Cheep to manufacture
Objective	Maximize bending stiffness of sheet
Free variable	Section profile

Penampang ideal seperti di bagian bawah Gambar 10.15 yang menunjukkan bagian A–A membesar. Faktor bentuk adalah rasio kekakuan pada lembaran dimple terhadap lembaran datarnya. Momen luasan kedua lembaran per satuan lebar adalah:

$$I_0 = \frac{t^3}{12}$$

Lembaran dimple dengan amplitudo a adalah:

$$I \approx \frac{1}{12} (2a + t)^2 t$$

Maka factor bentuknya adalah:

$$\phi_B^e = \frac{I}{I_0} \approx \frac{(2a + t)^2}{t^3}$$

Perhatikan bahwa faktor bentuk memiliki kesatuan nilai ketika amplitudo adalah nol, tetapi meningkat saat amplitudo meningkat. Faktor bentuk yang setara untuk kegagalan dalam lenturan adalah:

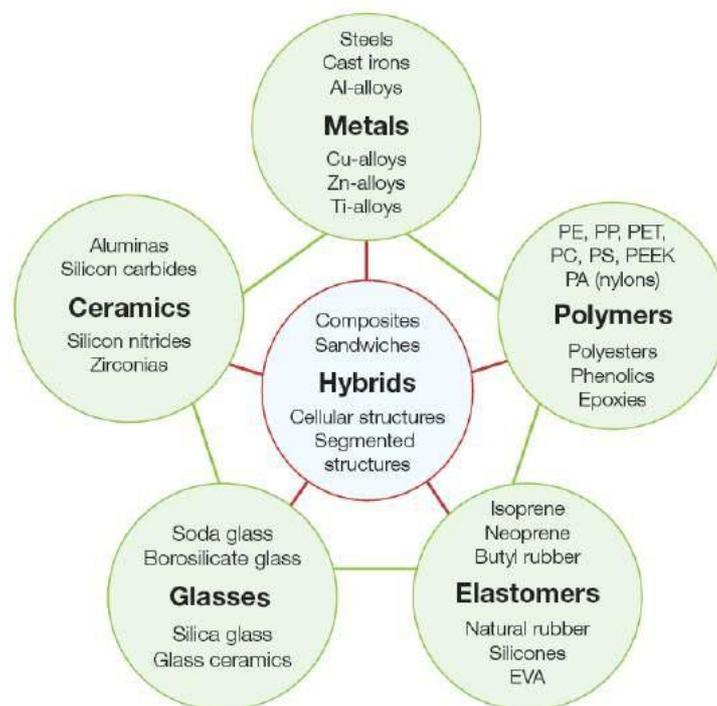
$$\phi_B^f = \frac{Z}{Z_0} \approx \frac{2a + t}{t}$$

Postscript. Dimple dapat diterapkan ke sebagian besar produk lembaran gulung. Baja lembaran ditemukan pada aplikasi industri mobil untuk *armature bumper*, rangka kursi, dan

batang benturan samping yang memungkinkan penghematan berat bodi tanpa mengorbankan kinerja mekanis. Lembaran yang kaku juga meningkatkan frekuensi getaran alaminya sehingga membantu menekan getaran di panel.

MATERIAL HYBRID

Material hibrida adalah kombinasi dari dua atau lebih bahan yang disusun sedemikian rupa sehingga memiliki atribut yang tidak ditawarkan oleh material tunggalnya (Gambar 11.1). Komposit partikulat dan berserat adalah contoh dari material hibrida, di samping *sandwich structures*, *lattice structures*, *segmented structure*. Dalam desain material diperlukan pertimbangan: pemilihan komponen, konfigurasi, fraksi volume relatif, dan skalanya (Tabel 11.1). Variabel baru memperluas cakupan desain, memungkinkan pembuatan "material baru" dengan profil properti tertentu.



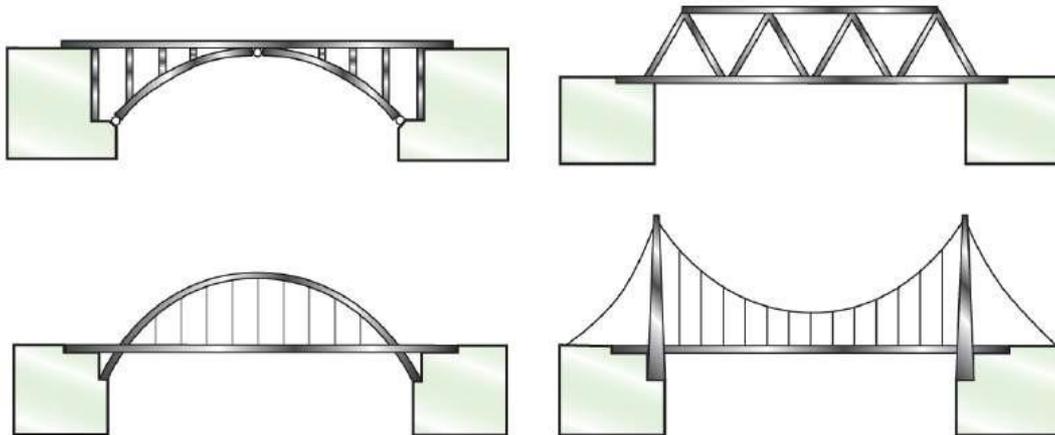
Gambar 11.1 Material hybrid menggabungkan dua atau lebih material monolitik

Tabel 11.1 Komponen desain hibrid

Component	The choice of materials to be combined
Configuration	The shape and connectivity of the component
Relative volumes	The volume fraction of each component
Scale	The length scale of the structural unit

Membandingkan hibrida seperti sandwich dengan bahan monolitik seperti polikarbonat atau titanium merupakan tantangan tersendiri? Untuk melakukan ini, maka sandwich tidak hanya sebagai hibrida dengan permukaan pada satu material yang terikat pada inti yang lain, tetapi sebagai "bahan" dengan sifatnya sendiri.

Pendekatan yang diadopsi di sini adalah cakupannya. Tujuannya adalah untuk merakit metode untuk memungkinkan sifat hibrida dipindai dan dibandingkan, mencari yang paling sesuai dengan persyaratan desain yang diberikan. Setelah material dan konfigurasi dipilih, metode standar seperti optimisasi dan analisis elemen terbatas dapat digunakan untuk memperbaikinya. Tetapi apakah metode standar yang tidak baik adalah pemindaian cepat kombinasi alternatif.



Gambar 11.2 Konfigurasi jembatan

Gambar 11.2 menunjukkan empat konfigurasi jembatan yang berbeda. Konfigurasi pertama, semua komponen dibebani kompresi. Yang kedua, komponen menerima pembebanan Tarik dan tekan, tergantung dimana beban bekerja. Yang ketiga dan keempat, kabel suspensi dibebani murni tarik. Salah satu dari konfigurasi ini dapat dioptimalkan, tetapi tidak ada jumlah optimasi yang akan menyebabkan satu berkembang menjadi yang lain karena ini melibatkan lompatan diskrit dalam konfigurasi, masing-masing ditandai dengan serangkaian variabelnya masing-masing.

Desain hibrid memiliki fitur yang sama, yaitu kelas hibrid dibedakan berdasarkan konfigurasinya, yaitu: struktur komposit, sandwich, seluler, dan tersegmentasi. Komposit merupakan gabungan dua komponen padat, satu (penguat) sebagai serat atau partikel, yang mengisi dalam komposit (matriks). Sandwich memiliki wajah luar dari satu bahan yang didukung oleh inti dari yang lain, biasanya bahan dengan kepadatan rendah. Konfigurasi yang memberikan kekakuan fleksibel per berat unit yang lebih besar dari yang ditawarkan oleh salah satu komponen saja.

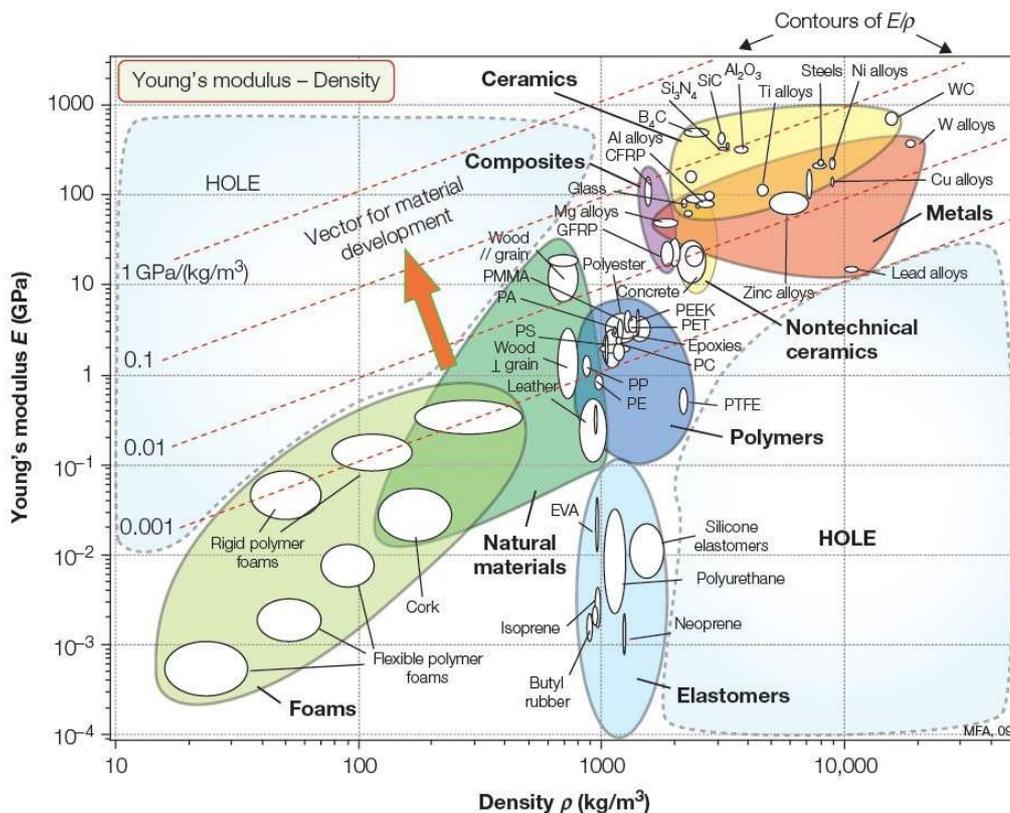
Struktur seluler adalah kombinasi dari material dan ruang. Konektivitas struts yang rendah memungkinkan untuk menekuk ketika kisi dibebani. Konektivitas yang lebih tinggi menekan lentur, memaksa strut untuk meregang. **Struktur tersegmentasi** adalah material yang dibagi dalam satu, dua, atau tiga dimensi.

Pendekatan yang diadopsi adalah metode batas untuk memperkirakan properti dari setiap konfigurasi. Sifat sepasang material dalam konfigurasi tertentu dapat dihitung. Kemudian diplot pada grafik pemilihan material, yang menjadi alat untuk memilih konfigurasi dan materi.

11.1 Lubang Dalam Ruang Properti Material

Gambar 11.3 menunjukkan diagram yang berisi material dan bagian-bagiannya. Beberapa bagian tidak dapat diakses karena alasan mendasar yang berhubungan dengan ukuran atom dan sifat kekuatan yang mengikat bersama-sama. Tetapi bagian lain kosong meskipun, pada prinsipnya, mereka bisa diisi.

Apakah ada yang bisa diperoleh dengan mengembangkan material (atau kombinasi material) yang terletak di lubang-lubang ini? Indeks material menunjukkan di mana dapat diperoleh keuntungan. Kisi baris dari satu indeks, E/ρ diplot dalam Gambar 11.3. Jika area yang diisi dapat diperluas ke arah panah (yaitu, ke nilai E/ρ yang lebih besar) akan memungkinkan struktur yang lebih ringan dan lebih kaku untuk dibuat. Panah terletak normal ke garis indeks. Ini mendefinisikan vektor untuk pengembangan material.

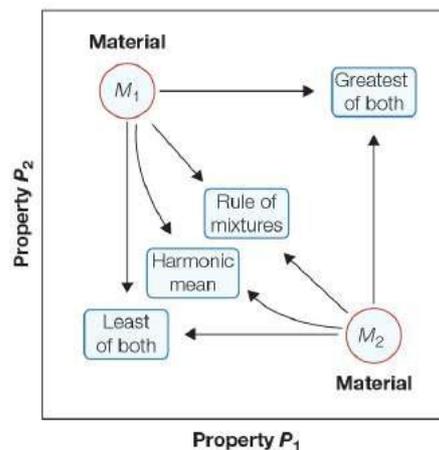


Gambar 11.3 Kekosongan pada ruang modulus-densitas

Salah satu pendekatan untuk mengisi lubang adalah dengan mengembangkan paduan logam baru, kimia polimer baru, dan komposisi baru kaca dan keramik sehingga dapat memperluas area populasi grafik properti. Mengembangkan bahan baru bisa menjadi proses yang mahal dan tidak pasti, dan keuntungannya cenderung bertahap. Alternatifnya adalah menggabungkan dua atau lebih material yang ada sehingga memiliki superposisi properti dengan membuat material hibrida. Keberhasilan spektakuler komposit yang diperkuat serat karbon dan kaca, bahan berbusa (hibrida bahan dan ruang) dapat mengisi area bagan properti yang sebelumnya kosong.

Gambar 11.4 menunjukkan dua material, M_1 dan M_2 diplot pada bagan dengan properti P_1 dan P_2 sebagai sumbu. Angka tersebut menunjukkan empat skenario, masing-masing kelas hibrida memiliki kekhasan tertentu. Tergantung pada konfigurasi bahan dan cara menggabungkan, maka diperoleh salah satu dari yang berikut ini.

1. Skenario "*the best of both*". Dikatakan ideal jika pembuatan material hibrida berasal sifat terbaik dari kedua komponen penyusunnya. Paling umum ketika properti suatu material dikombinasikan dengan sifat permukaan yang lain. Baja berlapis seng memiliki kekuatan dan ketangguhan baja dengan ketahanan korosi seng. Tembikar berkaca mengeksploitasi formabilitas dan biaya tanah liat yang rendah dengan impermeabilitas dan daya tahan kaca.



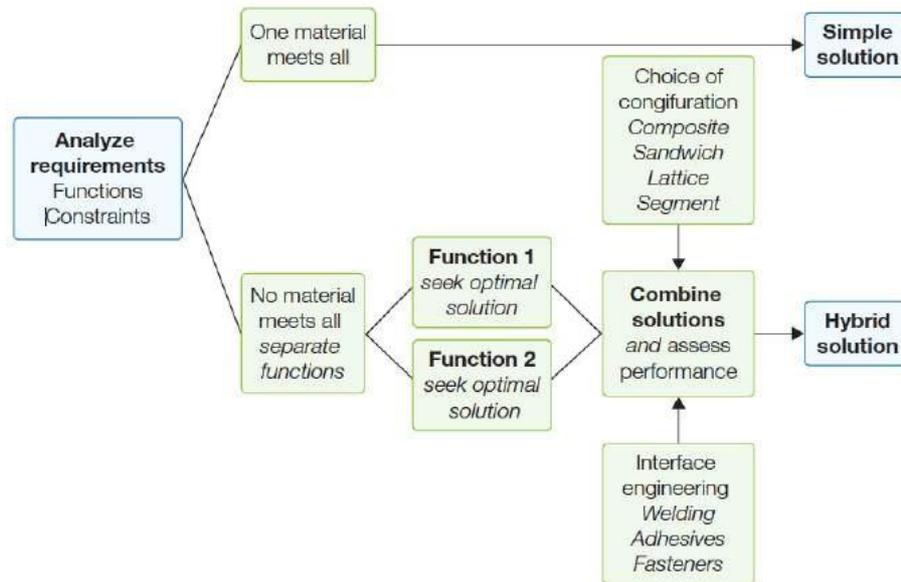
Gambar 11.4 Kemungkinan hibridisasi. Sifat hibrida mencerminkan bahan komponennya, dikombinasikan dalam salah satu dari beberapa cara.

2. Skenario "*the rule of mixture*". Ketika properti digabungkan dalam hibrida, seperti dalam komposit struktural, yang terbaik yang dapat diperoleh dari rata-rata aritmatika sifat komponen, ditimbang oleh fraksi volumenya. Dengan demikian komposit serat *unidirectional* memiliki modulus aksial (sejajar dengan serat) yang terletak dekat dengan aturan campuran.
3. Skenario "*the weaker link dominates*". Kadang-kadang kompromi dengan material yang lebih rendah perlu dilakukan, dikhususkan dengan kekakuan komposit partikulat, di mana sifat hibrida berada di bawah aturan campuran, terletak lebih dekat ke harmonik daripada rata-rata aritmatika properti. Meskipun kurang spektakuler, tetapi masih digunakan.
4. Skenario "*the least of both*" atau skenario tautan terlemah. Sistem penyiram api menggunakan hibrida logam lilin yang dirancang untuk gagal, melepaskan semprotan ketika titik leleh material yang lebih rendah (lilin) sudah terlampaui.

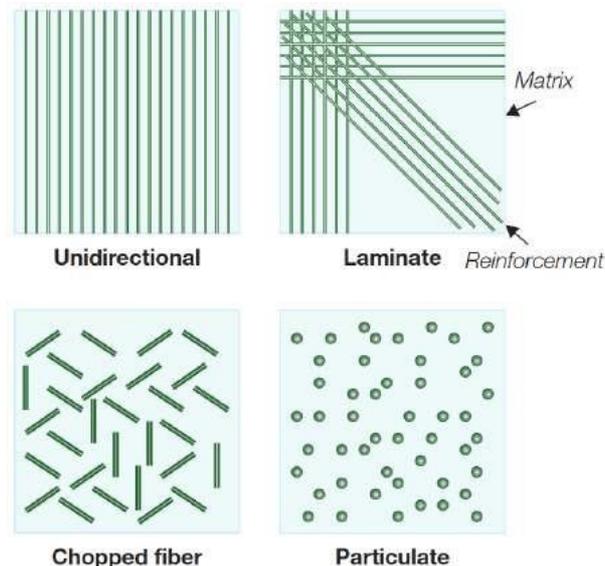
11.2 Metode: "Konfigurasi A + B + Skala"

Material hibrida adalah kombinasi dari dua atau lebih material dalam konfigurasi yang telah ditentukan, volume relatif, dan skala untuk melayani tujuan rekayasa tertentu secara optimal. Variabel desain baru dapat memperluas ruang desain, memungkinkan optimalisasi properti yang tidak mungkin jika pilihan terbatas pada material monolitik tunggal.

Ide dasar, diilustrasikan dalam Gambar 11.5. Material monolitik menawarkan portofolio properti tertentu di mana banyak desain rekayasa disandarkan. Persyaratan desain mengisolasi sektor ruang material-properti. Jika sektor ini mengandung material, persyaratan dapat dipenuhi dengan memilih salah satunya. Jika persyaratan desain harus dipenuhi, tidak ada material yang memenuhi semuanya: **persyaratan terletak pada lubang di ruang properti**.



Gambar 11.5 Tahapan merancang hibrida untuk memenuhi persyaratan desain yang diberikan.



Gambar 6 Skema hibrida dari jenis komposit: berserat unidirectional, serat laminasi, serat acak, dan komposit partikulasi.

Langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi dan memisahkan persyaratan yang bertentangan, mencari solusi setiap material yang optimal, kemudian menggabungkannya dengan cara mempertahankan atribut yang diinginkan dari keduanya. Pilihan terbaik adalah yang menempati peringkat paling tinggi ketika diukur dengan metrik kinerja yang memotivasi desain: meminimalkan massa atau biaya atau memaksimalkan beberapa aspek kinerja.

Kombinasi alternatif diperiksa dan dinilai, menggunakan kriteria keunggulan untuk menentukan peringkat. Output adalah spesifikasi hibrida dari material komponen dan konfigurasinya. Empat kelas struktur hibrida: komposit, sandwich, seluler, dan tersegmentasi.

11.3 Komposit

Insinyur pesawat terbang, pembuat mobil, dan peralatan olahraga memiliki satu kesamaan, yaitu material yang kaku, kuat, tangguh, dan ringan. Pilihan material tunggal yang paling baik adalah paduan ringan: paduan magnesium, aluminium, dan titanium. Banyak penelitian untuk meningkatkan sifat-sifatnya. Material tersebut tidak semua ringan, polimer memiliki densitas yang jauh lebih rendah, tetapi tidak semua yang kaku. Keramik jauh lebih kaku, terutama dalam bentuk partikel kecil atau serat tipis, jauh lebih kuat. Fakta-fakta ini dieksploitasi dalam keluarga hibrida struktural yang biasanya disebut sebagai komposit partikulat dan berserat.

Setiap dua material dapat dikombinasikan untuk membuat komposit dan dapat dicampur dalam banyak geometri (Gambar 11.6). Pada skala makroskopis, komposit berperilaku seperti padat homogen dengan seperangkat sifat mekanik, termal, dan listriknya.

Kriteria Keunggulan. Kami memerlukan kriteria keunggulan untuk menilai manfaat hibrida. Hibrida yang memiliki nilai melebihi bahan yang ada menjadi tujuan desain material.

Densitas. Ketika fraksi volume f dari penguatan r (densitas ρ_r) dicampur dengan fraksi volume $(1 - f)$ dari matriks m (kepadatan ρ_m) untuk membentuk komposit tanpa porositas sisa. Densitas komposit $\tilde{\rho}$ diberikan persis dengan aturan campuran (rata-rata aritmatika yang ditimbang oleh pecahan volume):

$$\tilde{\rho} = f\rho_r + (1 - f)\rho_m \dots \dots \text{Pers 11.1}$$

Geometri atau bentuk penguat tidak masalah kecuali dalam menentukan fraksi pengepakan maksimum penguat dan batas atas untuk f .

Modulus. Modulus komposit dikurung oleh batas Voigt dan Reuss. Batas atas \tilde{E}_α diperoleh dengan dalil bahwa pada pembebanan, kedua komponen mengalami regangan yang sama. Tegangan adalah rata-rata volume tegangan setempat, dan modulus komposit mengikuti aturan campuran:

$$\tilde{E}_\alpha = fE_\alpha + (1 - f)E_m \dots \dots \text{Pers 11.2a}$$

E_r adalah Modulus Young dari penguat dan E_m yang matriks. Batas bawah, \tilde{E}_L diperoleh dengan dalil sebagai ganti bahwa kedua komponen membawa tegangan yang sama. Regangan adalah rata-rata volume regangan setempat, dan modulus komposit adalah:

$$\tilde{E}_L = \frac{E_m E_\alpha}{fE_m + (1 - f)E_\alpha} \dots \dots \text{Pers 11.2b}$$

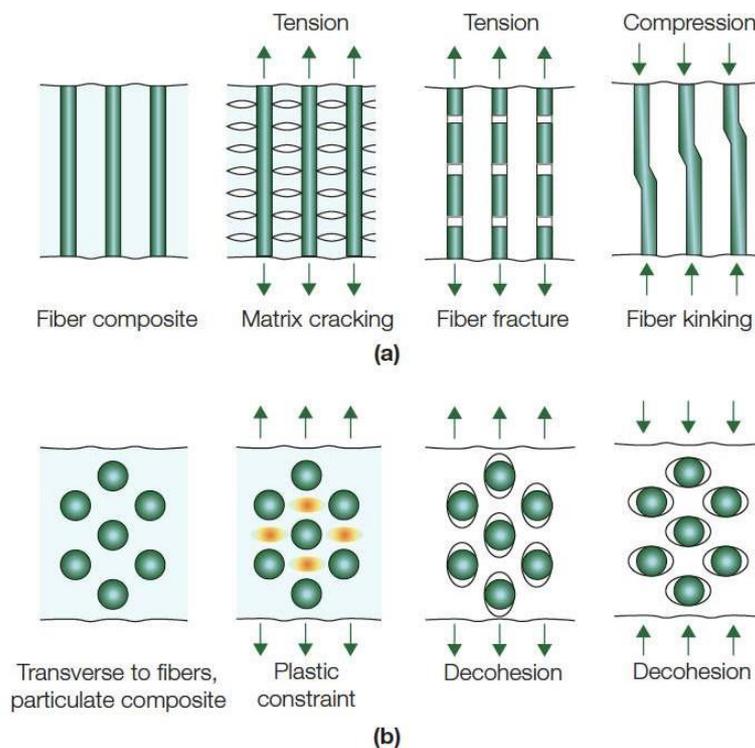
Kekuatan. Mekanisme kegagalan dan sensitifitas kekuatan dan ketangguhan terhadap pengotor dan cacat pemrosesan membuat pemodelan yang akurat menjadi sulit. Penguatan dengan serat “unidirectional” atau dengan dispersi.

Ketika beban pada komposit serat meningkat, maka beban didistribusikan kembali antara komponen sampai terjadi peluluhan atau patah (Gambar 11.8a). Di luar titik ini komposit telah mengalami deformasi atau kerusakan permanen tetapi masih dapat mendukung beban. Kegagalan akhir membutuhkan peluluhan atau fraktur atau keduanya. Komposit terkuat jika keduanya mencapai kegagalan secara bersamaan. Batas atas untuk ply serat kontinu seperti yang pada "unidirectional" pada Gambar 11.6 dibebani sejajar dengan serat adalah aturan campuran:

$$(\tilde{\sigma}_f)_{L,a} = f(\sigma_f)_f + (1 - f)(\sigma_f)_m \dots \dots \text{Pers 11.3a}$$

$(\sigma_f)_m$ adalah kekuatan matriks, dan $(\sigma_f)_f$ adalah penguatnya. Jika salah satu mengalami kegagalan sebelum yang lain, beban yang dibawa akan tetap aman. Dengan demikian batas bawah kekuatan tarik adalah:

$$(\tilde{\sigma}_f)_{L,a} = \text{greater of } \{f(\sigma_f)_f + (1 - f)(\sigma_f)_m\} \dots \dots \text{Pers 11.3b}$$



Gambar 11.7 Model Kegagalan dalam komposit

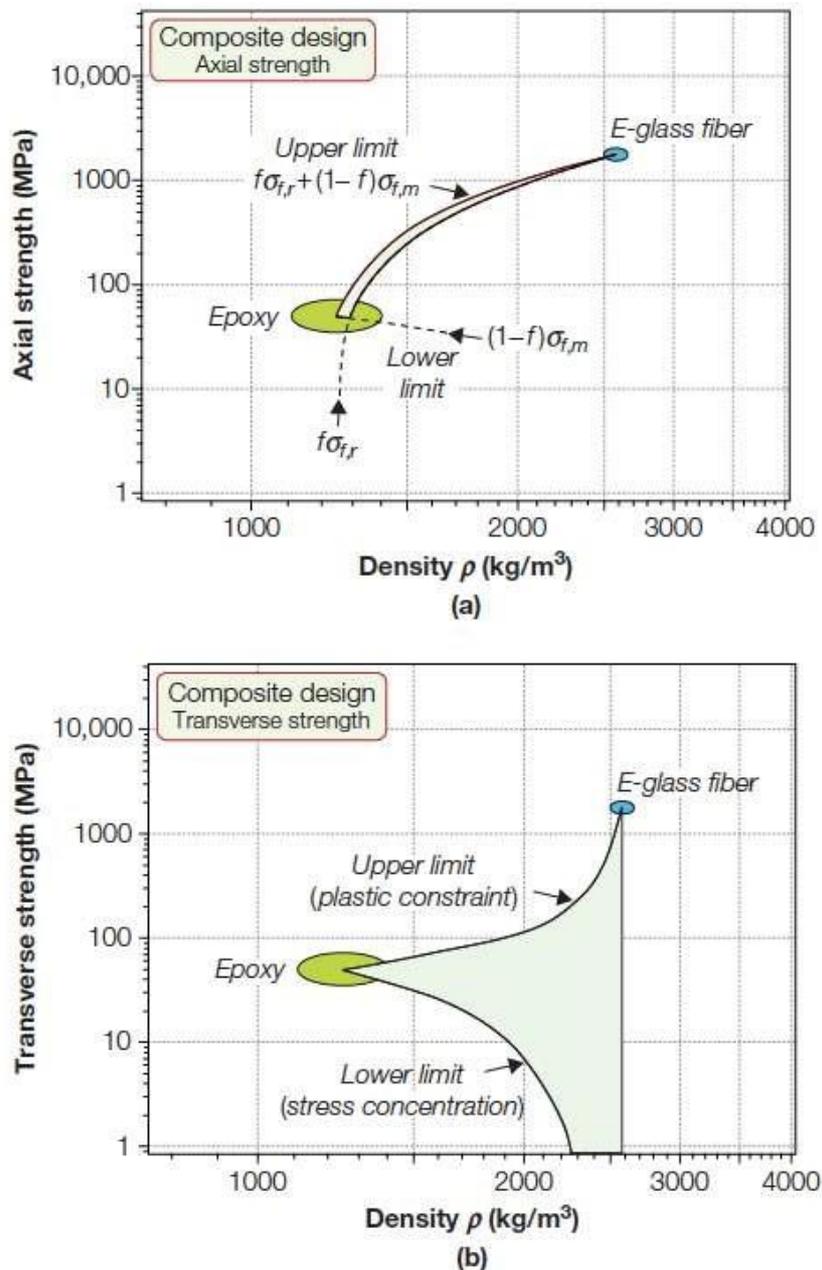
Menentukan kekuatan melintang (Gambar 11.8b) lebih sulit. Kekuatan melintang ditentukan oleh kekuatan ikatan antarmuka, distribusi serat, konsentrasi tegangan, dan void. Kekuatan melintang lebih kecil daripada matriks tanpa penguat, regangan untuk gagal juga lebih kecil. Dalam matriks ulet kontinu memiliki ikatan yang kuat, non-deforming, partikel atau serat, aliran dalam matriks dibatasi. Batasan meningkatkan tegangan yang diperlukan untuk aliran dalam matriks, yang memberikan kekuatan tarik batas atas adalah:

$$\text{Lesser of } \begin{cases} (\tilde{\sigma}_f)_{u,t} \approx (\sigma_f)_m \left(\frac{1}{(1-f^{1/2})} \right) \dots \dots \text{Pers 11.4a} \\ (\tilde{\sigma}_f)_{u,t} \approx (\sigma_f)_r \end{cases}$$

Kekuatan melintang lebih rendah daripada matriks saja karena konsentrasi tegangan dan debonding antarmuka antara serat dan matriks. Hull memberikan perkiraan batas bawah kekuatan tarik sebagai:

$$(\tilde{\sigma}_f)_{L,t} \approx (\sigma_f)_m \left(1 - f^{\frac{1}{2}} \right) \dots \dots \text{Pers 11.4b}$$

Dua pasang batasan memungkinkan potensi pilihan penguatan dan matriks yang diberikan untuk dieksplorasi. Gambar 11.9 menunjukkan batas untuk kekuatan aksial dan melintang dari lapisan komposit epoxy-glass.



Gambar 11.8 Batasan kekuatan lapisan komposit (a) aksial dan (b) transversal

Komposit serat kontinu dapat gagal dalam kompresi dengan serat kinking (Gambar 8a). Keriting ditahan oleh kekuatan geser matriks, kira-kira $0.5(\sigma_f)_m$. Ini menyebabkan tegangan kompresi axial untuk buckling dari serat adalah:

$$(\tilde{\sigma}_c)_{u,a} = \frac{1}{\vartheta} \frac{(\sigma_f)_m}{2} \approx 14(\sigma_f)_m \dots \dots \text{Pers 11.5}$$

ϑ adalah ketidakselarasan awal serat dari sumbu kompresi, dalam radian. Dari eksperimen diperoleh nilai khusus dalam komposit yang diselaraskan yaitu $\vartheta \approx 0.35$. Dengan mengidentifikasi batasan atas dengan berkurangnya nilai ϑ dan Persamaan 3a. Ketidakselarasan semakin tidak terkendali jika $\vartheta = 1$, maka kekuatannya sangat turun.

Panas Spesifik. Panas spesifik benda padat pada tekanan konstan C_p hampir sama dengan yang pada volume konstan C_v . Kapasitas panas per volume satuan komposit ditentukan dengan aturan campuran:

$$\tilde{\rho}C_p = f\rho_r(C_p)_r + (1 - f)\rho_m(C_p)_m \dots \dots \text{Pers. 11.6}$$

di mana $(C_p)_r$ adalah panas spesifik penguat dan $(C_p)_m$ adalah matriks (J/kg.K). Sedikit perbedaan muncul karena ekspansi termal menghasilkan ketidakcocokan antara komponen ketika komposit dipanaskan. Ketidakcocokan menciptakan tekanan lokal komponen dan mengubah panas tertentu.

Koefisien Ekspansi Termal. Ekspansi termal komposit ke beberapa arah, lebih besar dari komponen yang lain. Ini karena konstanta elastis, rasio Poisson, pasangan regangan elastis utama. Jika matriks ditahan untuk ekspansi ke satu arah maka akan berekspansi lebih banyak ke arah melintang. Perkiraan batas bawah adalah:

$$\alpha_L = \frac{E_r\alpha_r f + E_m\alpha_m(1 - f)}{E_r f + E_m(1 - f)} \dots \dots \text{Pers 11.7}$$

Batas atas:

$$\tilde{\alpha}_u = f\alpha_r(1 + \nu_r) + (1 - f)\alpha_m(1 + \nu_m) - \alpha_L[f\nu_r + (1 - f)\nu_m] \dots \dots \text{Pers 11.8}$$

dimana α_r dan α_m adalah koefisien ekspansi thermal, ν_r dan ν_m adalah rasio Poisson.

Konduktivitas termal. Konduktivitas termal menentukan aliran panas pada kondisi yang stabil. Komposit dari dua material diikat untuk memberikan kontak termal yang baik, memiliki konduktivitas termal λ yang terletak di antara komponen tunggalnya λ_m dan λ_r . Komposit yang terdiri dari serat kontinu paralel memiliki konduktivitas, sejajar dengan serat yang dihitung dengan aturan campuran:

$$\tilde{\lambda}_u = f\lambda_r + (1 - f)\lambda_m \dots \dots \text{Pers 11.9}$$

persamaan di atas adalah batas atas. Pada arah yang lain, konduktivitasnya lebih rendah. Konduktivitas transversal (melintang) pada komposit serat paralel terletak di dekat batas bawah yang dinyatakan oleh Maxwell:

$$\tilde{\lambda}_L = \lambda_m \left(\frac{\lambda_r + 2\lambda_m - 2f(\lambda_m - \lambda_r)}{\lambda_r + 2\lambda_m + f(\lambda_m - \lambda_r)} \right) \dots \dots \text{Pers 11.10}$$

Komposit partikulat memiliki konduktifitas di dekat batas bawah ini. Konduktivitas antarmuka yang buruk dapat membuat turunnya nilai λ . Debonding atau lapisan antarmuka antara penguat dan matriks adalah penyebabnya.

Difusifitas Panas. Difusifitas panas dinyatakan dengan persamaan di bawah ini:

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

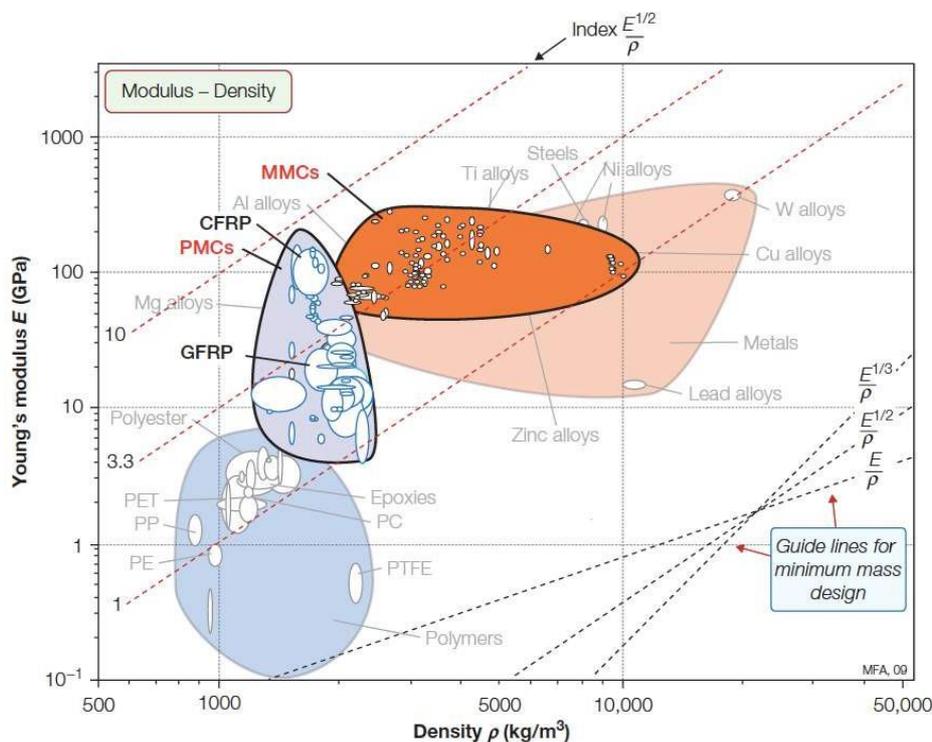
Menentukan aliran panas ketika kondisinya transien, yaitu ketika suhu berubah seiring waktu. Ini dibentuk dari tiga properti sebelumnya λ , ρ dan C_p . Difusi dinyatakan sebagai:

$$\tilde{a} = \frac{\tilde{\lambda}}{f\rho_r(C_p)_r + (1-f)\rho_m(C_p)_m} \dots \dots \text{Pers 11.11}$$

Batas atas dan bawah ditemukan dengan substitusi untuk $\tilde{\lambda}$ (Persamaan 11.9 dan 11.10) ke dalam persamaan ini.

Konstanta Dielektrik. Konstanta dielektrik berdasarkan aturan campuran adalah:

$$\tilde{\epsilon}_c = f\epsilon_{c,r} + (1-f)\epsilon_{c,m} \dots \dots \text{Pers 11.12}$$



Gambar 11.11 PMC dan MMC memperluas area ruang modulus-densitas.

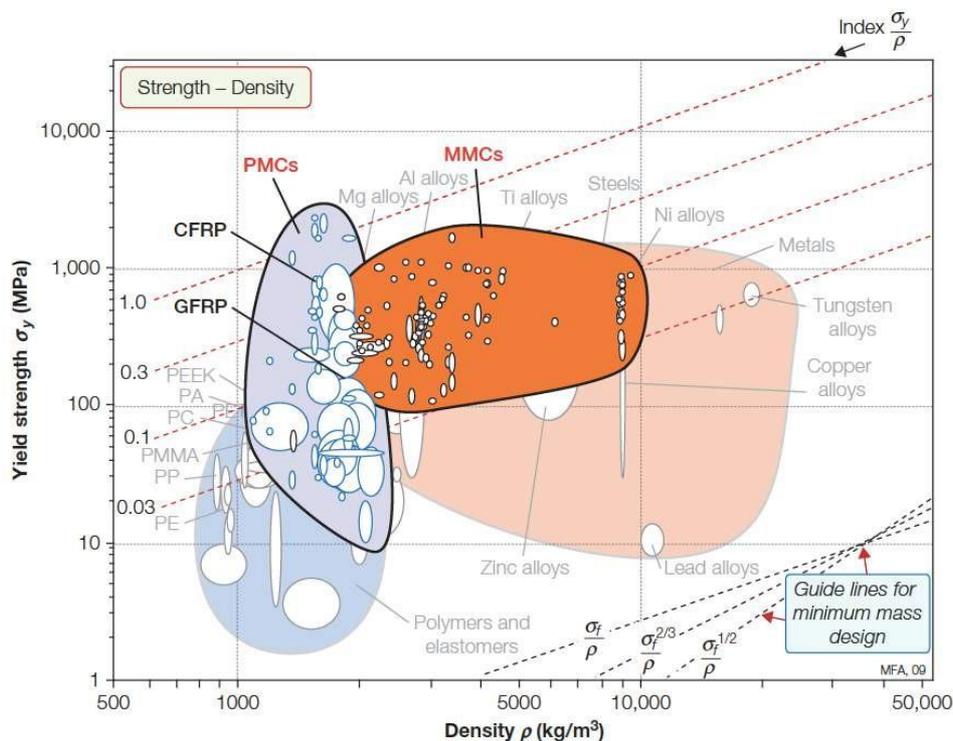
Konduktivitas Listrik dan Percolation. Ketika konduktivitas listrik komponen komposit memiliki besaran yang sebanding, batas untuk konduktivitas listrik sama dengan konduktivitas termal.

Mengisi Ruang Properti Dengan Komposit. Pengembangan komposit telah mengisi okupansi ruang properti material. Gambar 11 adalah diagram modulus-density ($E - \rho$). Area yang diisi oleh logam dan polimer yang tidak diperkuat berwarna merah pucat dan biru pucat, anggota diberi label abu-abu. Komposit matriks polimer menempati zona ungu yang lebih

berani. Komposit matriks logam ditunjukkan dengan warna merah gelap. Keduanya meluas ke area yang sebelumnya kosong. Demikian juga untuk Gambar 11.12.

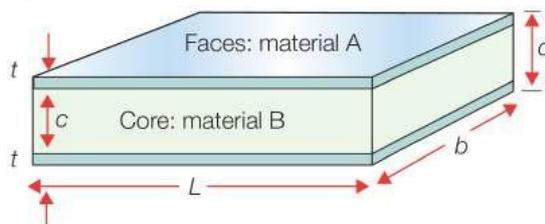
11.4 Struktur Sandwich

Panel sandwich melambangkan konsep hibrida. Ini menggabungkan dua bahan dalam geometri dan skala tertentu, dikonfigurasi sedemikian rupa sehingga satu membentuk muka dan yang lain adalah inti untuk memberikan struktur dengan kekakuan dan kekuatan lentur yang tinggi pada bobot yang rendah Gambar 13. Pemisahan muka dengan inti akan meningkatkan momen inersia penampang I dan modulus penampang Z menghasilkan struktur yang tahan terhadap beban lentur dan tekukan. Sandwich digunakan untuk menghemat berat, seperti pada pesawat terbang, kereta api, kendaraan bermotor, struktur portabel, dan peralatan olahraga.



Gambar 11.12 PMC dan MMC memperluas area ruang kekuatan-densitas.

Permukaan dengan ketebalan t membawa sebagian besar beban, sehingga harus kaku dan kuat. Karena membentuk permukaan eksterior pada panel maka harus mentolerir lingkungan tempat ia beroperasi. Inti dengan ketebalan c , menempati sebagian besar volume. Material ini harus ringan dan kaku dan cukup kuat untuk membawa tegangan geser yang diperlukan untuk membuat seluruh panel berperilaku sebagai satuan beban bantalan.



Gambar 11.13 Struktur sandwich

Sandwich sebagai "material". Selain sandwich sebagai struktur, maka sandwich juga dianggap sebagai material A yang didukung pada inti material B dengan densitas, modulus, dan kekuatannya masing-masing. Semua konstruksi menggunakan indeks material yang berlaku tidak berubah. Simbol yang muncul di bagian ini didefinisikan dalam Tabel 11.2.

Tabel 11.2. Simbol

Symbol	Meaning and unusual units
t, c, d	Face thickness, core thickness, and overall panel thickness (m)
L, b	Panel length and width (m)
m_a	Mass per unit area of panel (kg/m^2)
$f = 2t/d$	Relative volumes occupied by faces
$(1-f) = c/d$	Relative volume occupied by core
I	Second moment of area (m^4)
ρ_f, ρ_c	Densities of face and core material (kg/m^3)
$\tilde{\rho}$	Equivalent density of panel (kg/m^3)
E_f	Young's modulus of faces (GN/m^2)
E_c, G_c	Young's modulus and share modulus of core (GN/m^2)
$\tilde{E}_{\text{in-plane}}, \tilde{E}_{\text{flex}}$	Equivalent in-plane and flexural modulus of panel (GN/m^2)
σ_f	Yield strength of faces (MN/m^2)
σ_c, τ_c	Yield strength and shear-yield strength of core (MN/m^2)
$\tilde{\sigma}_{\text{in-plane}}$	Equivalent in-plane strength of panel (MN/m^2)
$\tilde{E}_{\text{flex1}}, \tilde{E}_{\text{flex2}}, \tilde{E}_{\text{flex3}}$	Equivalent flexural strength of panel, depending on mechanism of failure (MN/m^2)

Menemukan Sifat yang Setara dari Bahan Terstruktur Dengan Percobaan.

Pertimbangkan struktur sandwich dengan pelapis padat yang dipisahkan dengan inti sel. Panel memiliki densitas yang sama dengan massa dibagi volumenya m_a/d , di mana m_a adalah massa per satuan luas dan $d = 2t + c$ adalah ketebalan total. Panel ini memiliki kekakuan fleksibel, diukur dengan membebani panel dalam lentur dan merekam defleksinya. Material homogen yang setara dengan:

$$\rho = \rho; \quad EI = EI; \quad I = \frac{12EI}{bd^3}$$

$$\tilde{\rho} = \frac{m_a}{d} \dots \dots \text{Pers. 11.13}$$

$$\tilde{E} = \frac{12EI}{bd^3} \dots \dots \text{Pers. 11.14}$$

Pembebanan panel hingga gagal memungkinkan momen M_f diukur secara eksperimental. Kekuatan lentur:

$$\tilde{Z}\tilde{\sigma}_{\text{flex}} = M_f$$

$$\tilde{Z} = \frac{bd^2}{4}$$

Kekuatan fleksibel ekivalen adalah:

$$\tilde{\sigma}_{flex} = \frac{4M_f}{bd^2} \dots \dots \text{Pers 11.15}$$

Sifat Ekuivalen Struktur Sandwich Dengan Analisis. Kekakuan dan kekuatan panel sandwich mengekspresikan sifat bahan homogen yang setara. Simbol didefinisikan sebelumnya dalam Tabel 2.

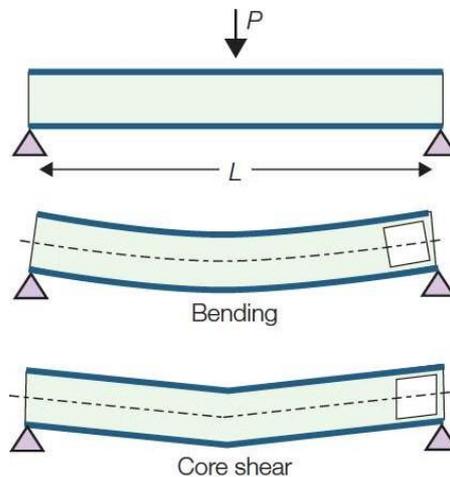
Densitas Ekuivalen. Densitas sandwich adalah:

$$\tilde{\rho} = f\rho_f + (1 - f)\rho_c \dots \dots \text{Pers 11.16}$$

$$f = \frac{2t}{d}$$

Sifat Mekanis. Panel sandwich dirancang agar kaku dan kuat selama pembebanan lentur. Panel sebagai "material" membedakan modulus bidang dan kekuatan bidang dalam lentur. Modulus dan kekuatan bidang efektif ditentukan dengan aturan campuran.

Modulus Flexural Ekuivalen. Dari Gambar 11.14 diperoleh kekakuan lentur sebagai berikut:



Gambar 11.14. Kekakuan flexural panel sandwich

$$EI = \frac{b}{12} (d^3 - c^3) E_f + \frac{bc^3}{12} E_c$$

Kekakuan geser dinyatakan dengan:

$$AG = \frac{bd^2}{c} G_c$$

E_f adalah modulus Young pelapis, G_c adalah modulus geser inti, dan A adalah luas penampangnya. Dengan penjumlahan, maka diperoleh densitas:

$$\delta = \frac{12PL^3}{B_1 b \{ (d^3 - c^3) E_f + c^3 E_c \}} + \frac{PLc}{B_2 d^2 b G_c} \dots \dots \text{Pers 11.17}$$

Konfigurasi beban akan menentukan nilai konstanta B_1 dan B_2 , dirangkum di Tabel 11.3.

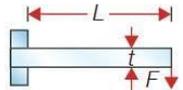
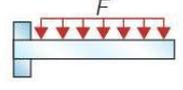
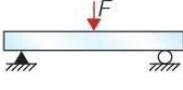
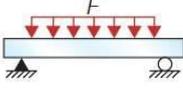
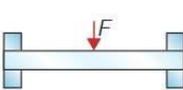
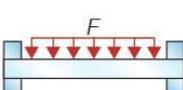
$$\frac{1}{E_{flex}} = 1 \frac{1}{E_f \{ (1 - (1 - f)^3) + \frac{E_c}{E_f} (1 - f)^3 \}} + \frac{B_1}{B_2} \left(\frac{d}{L} \right)^2 \frac{(1 - f)}{G_c} \dots \dots \text{Pers 11.18}$$

Kekuatan Flexural Ekuivalen. Panel sandwich dapat mengalami kegagalan dalam banyak cara (Gambar 11.15). Kekuatan fleksibel ekuivalen setiap mode ditentukan pada nilai yang terendah.

Peluluhan Muka Material. Momen plastisitas sandwich adalah:

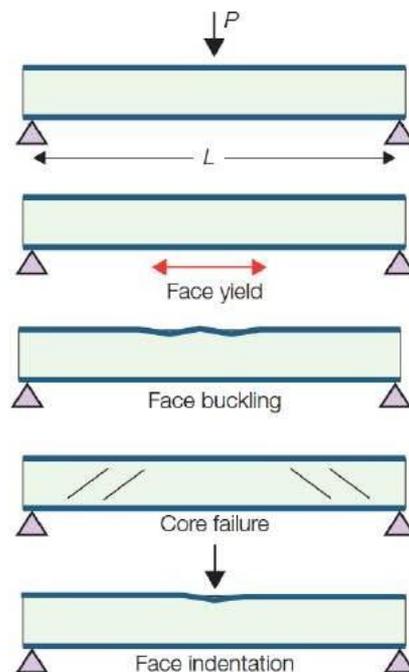
$$M_f = \frac{b}{4} \{ (d^2 - c^2) \sigma_f + c^2 \sigma_c \}$$

Tabel 11.3. Konstanta model pembebanan

Mode of Loading	Description	B_1	B_2	B_3	B_4
	Cantilever, end load	3	1	1	1
	Cantilever, uniformly distributed load	8	2	2	1
	Three-point bend, central load	48	4	4	2
	Three-point bend, uniformly distributed load	384/5	8	8	2
	Ends built in, central load	192	4	8	2
	Ends built in, uniformly distributed load	384	8	12	2

Jika $c/d = (1 - f)$ maka kekuatan gagal ekuivalen ketika terjadi peluluhan muka material adalah model kegagalan dominan:

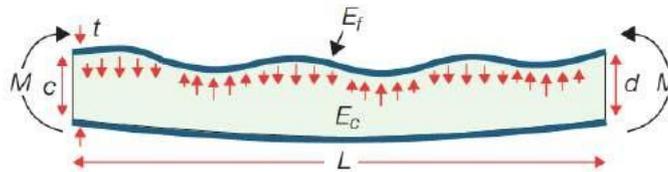
$$\tilde{\sigma}_{flex1} = (1(1 - f)^2 \sigma_f + (1 - f)^2) \sigma_c \dots \dots \text{Pers 11.19}$$



Gambar 11.15 Mode kegagalan panel sandwich karena flexural

Tekukan Permukaan Material. Pada pembebanan lentur, satu permukaan akan mengalami kompresi (Gambar 11.16). Jika terjadi tekukan, maka sandwich mengalami kegagalan. Tegangan permukaan yang terjadi adalah:

$$\sigma_b = 0.57(E_f E_c^2)^{\frac{1}{3}} \dots \dots \text{Pers 11.20}$$



Gambar 16 Face buckling

Buckling menjadi masalah ketika kulit permukaan tipis dan inti hanya sedikit menopang beban. Momen kegagalan M_f adalah:

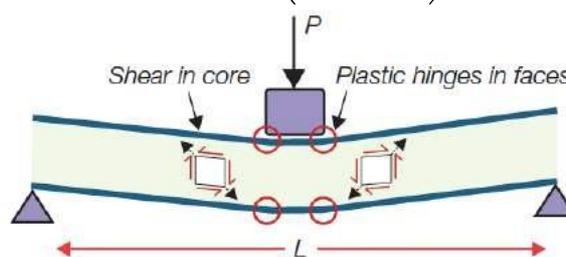
$$M_f = 2\sigma_b tbc = 1.14(E_f E_c^2)^{\frac{1}{3}} tbc$$

Dari persamaan 11.2 sebelumnya diperoleh:

$$\tilde{\sigma}_{flex2} = 1.14f(E_f E_c^2)^{\frac{1}{3}} \dots \dots \text{Pers 11.21}$$

Geseran Inti. Kegagalan karena geseran inti (Gambar 17) terjadi pada beban:

$$P_f = B_4 bc \left(\tau_c + \frac{t^2}{cL} \sigma_f \right)$$



Gambar 11.17 Core shear

Kekuatan ekuivalen ketika kegagalan oleh geseran adalah:

$$\tilde{\sigma}_{flex3} = \frac{B_4}{B_3} \left\{ 4 \frac{L}{d} (1-f) \tau_c + f^2 \sigma_f \right\} \dots \dots \text{Pers 11.22}$$

Indentasi. Tekanan indentasi adalah:

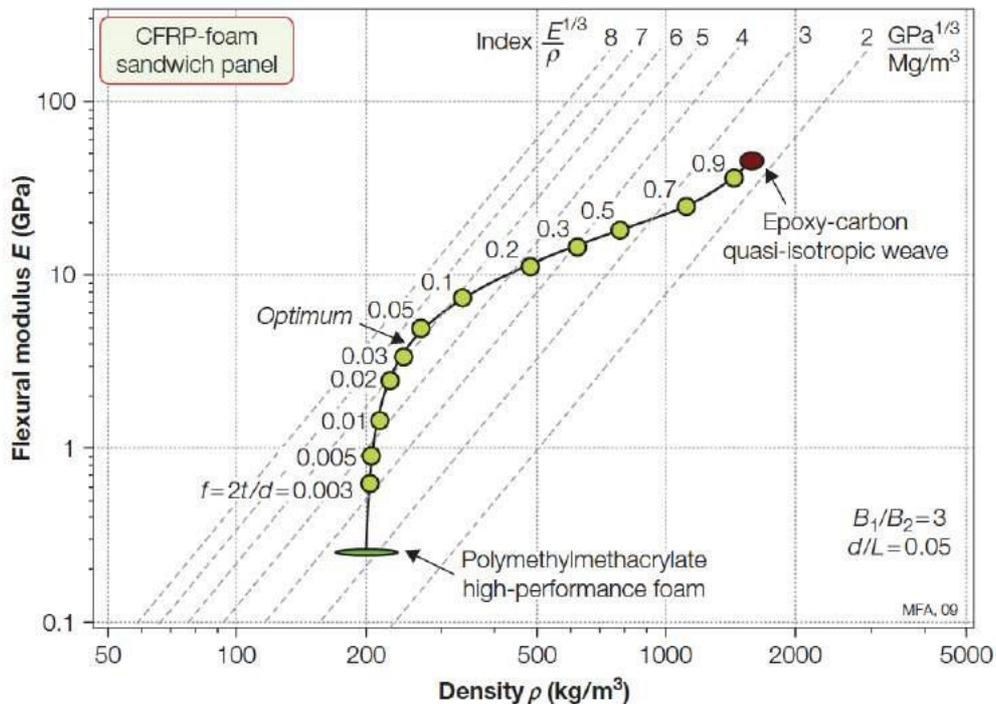
$$\frac{F}{ab} = P_{ind} = \frac{2t}{a} \left(\sigma_y \sigma_y \right)^{\frac{1}{2}} + \sigma_y \dots \dots \text{Pers 11.23}$$

Efisiensi Struktur Sandwich. Perbandingan antara sandwich dengan material monolitik diilustrasikan dalam Gambar 18 dan 19. Densitas ekuivalen $\tilde{\rho}$ dan modulus flexural ekuivalen \tilde{E} (Pers 11.16 dan 11.18) untuk sandwich, menggunakan data dalam Tabel 11.4. Permukaan lembaran CFRP dikombinasikan dengan inti busa berkinerja tinggi dalam rasio yang berbeda, bertingkat sepanjang nilai $2t/d$ untuk rasio d/L yang dipilih. Nilai indeks untuk panel yang ringan dan kaku adalah:

$$M_3 = \frac{E^{\frac{1}{3}}}{\rho}$$

Panel optimal from kekakuan per satuan berat adalah kontur yang bersinggungan dengan lintasan. Gambar tersebut menunjukkan bahwa ini terjadi pada $f \approx 0,04$, yang memberikan panel yaitu 2.8 kali lebih ringan dari panel CFRP padat dengan kekakuan yang sama atau:

$$(2.8)^3 = 22 \text{ kali lebih ringan pada massa yang sama}$$



Gambar 11.18 Modulus dan densitas ekivalen sandwich CFRP-foam dibandingkan dengan material tunggal.

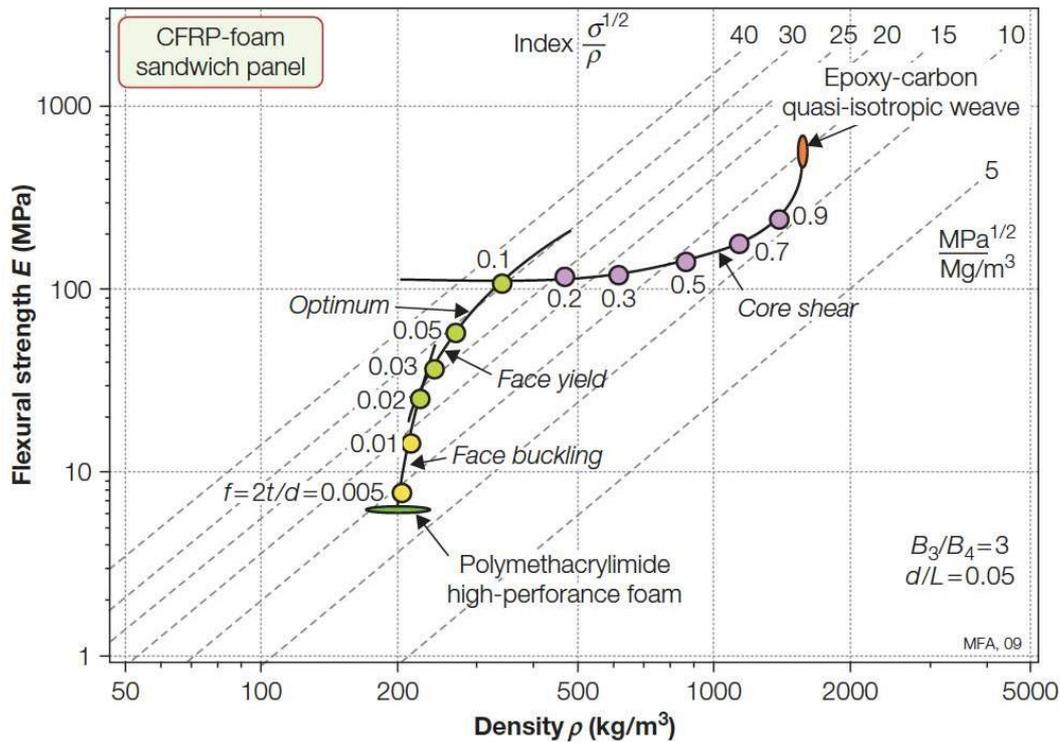
Kekuatan kegagalan ekivalen menjadi kurang dari $\tilde{\sigma}_{flex1}$, $\tilde{\sigma}_{flex2}$, dan $\tilde{\sigma}_{flex3}$ (Pers. 11.19, 11.20, 11.21). Face buckling mendominasi untuk $f < 0.025$, face yield mendominasi dari $f = 0.025 - 0.1$ ketika ber geser ke inti. Tanda kurung menunjukkan kekuatan struktur sandwich CFRP-busa yang dapat dicapai, dan memungkinkan perbandingan langsung dengan bahan monolitik. Kontur menunjukkan indeks untuk struktur yang kuat dan ringan:

$$M_6 = \frac{\sigma^{\frac{1}{2}}}{\rho}$$

Tabel 11.4 Data for face and core sandwich

Face and core material	Density ρ (kg/m³)	Modulus E (GPa)	Strength σ_f (MPa)
Carbon-epoxy quasi-isotropic weave	1570	46	550
Polymethacrylimide high-performance foam	200	0.255	6.8

Persamaan ini menyatakan efisiensi material ketika kekuatan lentur menjadi persyaratan utama. Optimal terletak tepat di bawah $f = 0.1$, di mana panel 2 kali lebih ringan dari panel CFRP padat pada kekuatan yang sama (atau $2^2 = 4.0$ kali lebih kuat untuk massa yang sama).



Gambar 11.19 Kekuatan dan densitas ekivalen sandwich CFRP-foam dibandingkan dengan material monolitik

Sifat Termal. Panas spesifik C_p mengikuti aturan campuran (Pers 11.6). Konduktifitas termal bidang mengikuti aturan (Pers 9). Konduktifitas melalui ketebalan diberikan *harmonic mean*:

$$\tilde{\lambda}_\perp = \left(\frac{f}{\lambda_f} + \frac{(1-f)}{\lambda_c} \right)^{-1} \dots \dots \text{Pers 11.24}$$

Ekspansi termal bidang menjadi rumit karena faktanya bahwa permukaan dan inti memiliki koefisien ekspansi yang berbeda, tetapi terikat bersama dan dipaksa menerima tegangan yang sama. Batasan ini mengarah pada koefisien ekspansi bidang:

$$\tilde{\alpha}_{//} = \frac{fE_f\alpha_f + (1-f)E_c\alpha_c}{fE_f + (1-f)E_c} \dots \dots \text{Pers 11.25}$$

Koefisien ketebalan melalui lebih sederhana; itu diberikan oleh rata-rata tertimbang

$$\tilde{\alpha}_\perp = f\alpha_f + (1-f)\alpha_c$$

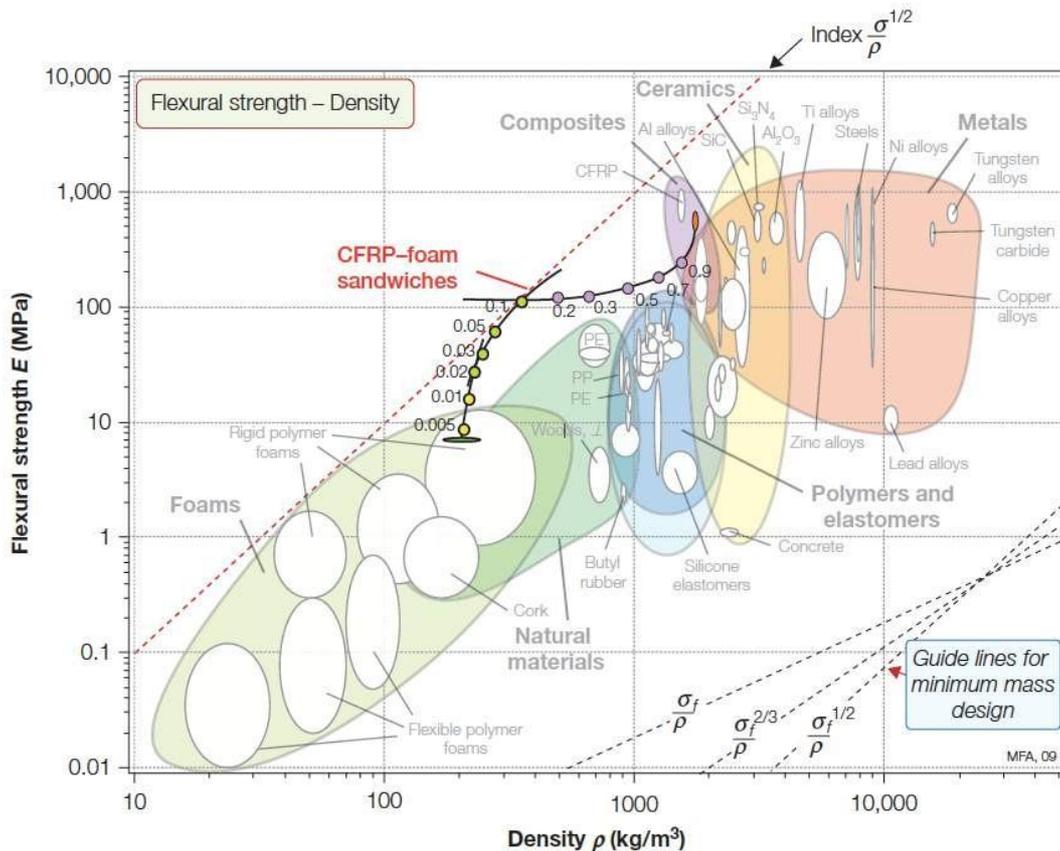
Sifat Elektrik. Konstanta dielektrik sandwich ditentukan berdasarkan aturan campuran (Pers. 11.12) dengan $f = 2t/d$. Busa polimer memiliki konstanta dielektrik yang sangat rendah, sehingga sandwich dengan muka GFRP dan inti busa polimer memungkinkan konstruksi cangkang yang kaku dan kuat dengan rugi-rugi dielektrik yang sangat rendah. Konduktifitas elektrik bidang mengikuti aturan campuran. Konduktifitas elektrik melalui ketebalan seperti panas dinyatakan dengan harmonic mean yang ekivalen dengan Pers 11.24.

Mengisi Ruang Properti Dengan Struktur Sandwich. Struktur sandwich dapat memperluas okupansi ruang properti material. Gambar 11.20 adalah penampang modulus-densitas flexural. Luasan diisi dengan logam, polimer, keramik, komposit dan busa digambarkan dengan warna

pucat, bagian lainnya diberi warna abu-abu. Kekakuan dan densitas sandwich CFRP-busa ditumpangkan pada Gambar 11.18.

Nilai $0.01 < f < 0.2$ meluas ke area yang sebelumnya kosong. Dengan menggunakan indeks $E^{1/3}/\rho$ menghasilkan panel yang ringan dan kaku sebagai kriteria keunggulan.

Gambar 11.21 menunjukkan kasus yang serupa untuk diagram kekuatan-densitas. Pengkodean warnanya sama dengan yang ada pada gambar sebelumnya. Sandwich memperluas area populasi dengan menggunakan indeks untuk panel yang ringan dan kuat ($\sigma_f^{1/2}/\rho$) sebagai kriteria yang menawarkan peningkatan kinerja.



Gambar 11.21 Data sandwich Gambar 19 ditumpangkan pada diagram densitas-kekuatan

11.5 Struktur Sel—Busa Dan Kisi.

Struktur sel bisa dan kisi adalah hibrida dari padat dan gas. Konduktivitas termal busa dengan densitas rendah digunakan untuk isolasi ditentukan oleh konduktivitas gas yang terkandung dalam pori-porinya. Konstanta dielektrik dan potensi kerusakan dan kompresi tergantung pada sifat gas.

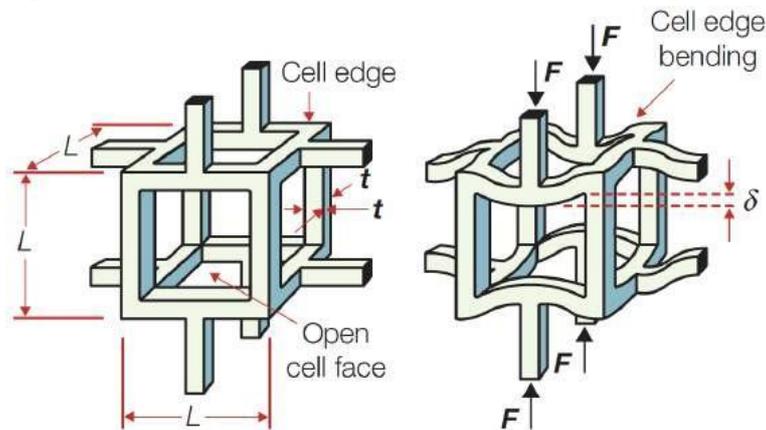
Busa adalah struktur yang didominasi oleh lenturan. Struktur kisi triangulasi didominasi peregangan. Busa dengan densitas relatif 0.1 (yang berarti bahwa dinding sel padat menempati 10% dari volume) kurang kaku (faktor 10) daripada kisi triangulasi dari densitas relatif yang sama.

Busa: Struktur Yang Didominasi Bending. Busa adalah padatan sel yang dibuat dari perluasan polimer, logam, keramik, atau kaca dengan agen berbuisa. Gambar 11.22 menunjukkan sel ideal dari busa dengan densitas rendah. Kontruksi ini terdiri dari dinding sel

padat yang mengelilingi ruang kosong yang berisi gas atau cairan. Padatan sel ditandai dengan densitas relatifnya ($t \ll L$) adalah:

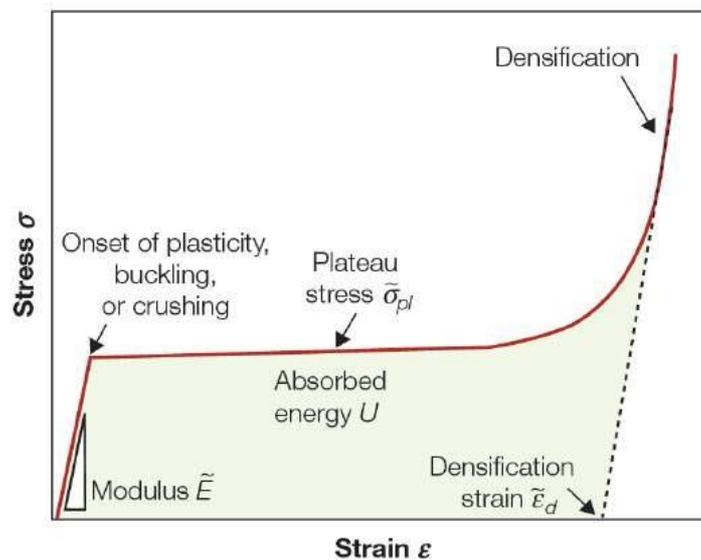
$$\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \approx \left(\frac{t}{L}\right)^2 \dots \dots \text{Pers 11.27}$$

Dimana $\tilde{\rho}$ adalah densitas busa, ρ_s adalah densitas padatan material, L adalah ukuran sel dan t adalah ketebalan tepi sel.



Gambar 11.22 Sel dalam busa densitas rendah

Sifat Mekanis. Kurva tegangan-regangan kompresi dari busa yang didominasi lentur seperti pada Gambar 11.23. Materialnya elastis linear, dengan modulus \tilde{E} hingga batas elastisnya, di titik tepi sel menghasilkan peluluhan, buckling dan atau patah. Busa kontinu runtuh pada tegangan yang hampir konstan ketika tegangan meningkat dengan cepat.



Gambar 11.23 Tegangan pada lintasan tinggi ditentukan oleh bukling, lentur plastik, atau retaknya dinding sel.

Tegangan kompresi dengan gaya $F \propto \sigma L^2$ pada tepi sel menyebabkan lenturan dan mengarah ke defleksi lentur δ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.22. Untuk struktur sel terbuka yang ditunjukkan pada gambar, defleksi lentur (Lampiran B.3) adalah:

$$\delta \propto \frac{FL^3}{E_s I}$$

di mana E_s adalah modulus padat busa dibuat dan I adalah momen luasan kedua. Regangan kompresi yang dialami oleh sel secara keseluruhan kemudian diolah $\varepsilon = 2\delta/L$. Modulus gabus adalah:

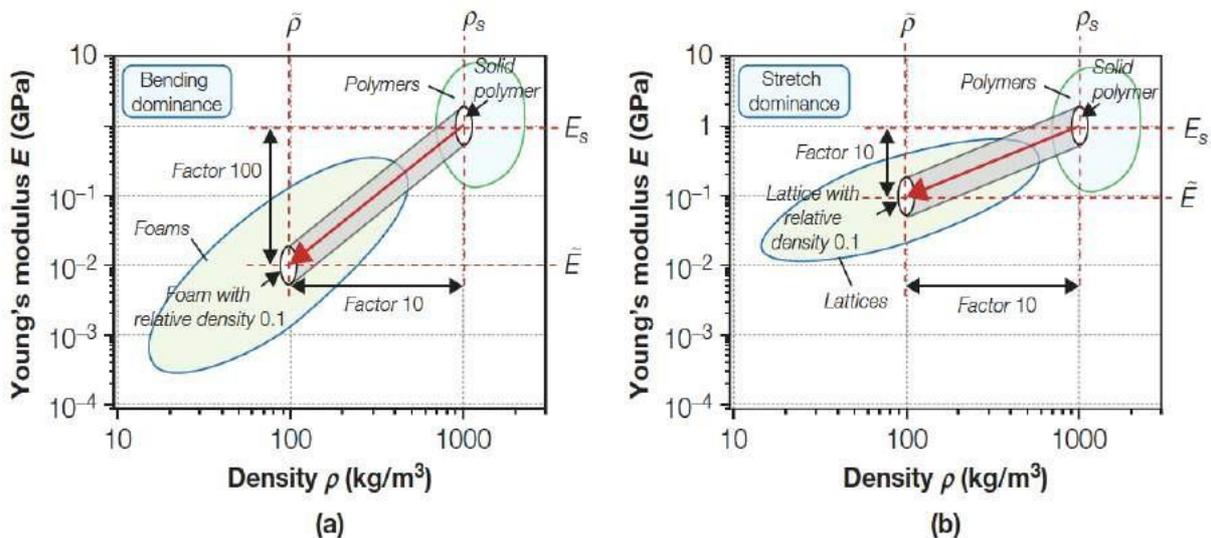
$$\frac{\tilde{E}}{E_s} \propto \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)^2 \dots \dots \text{Pers 11.29}$$

Ketika gaya diberikan pada busa melebihi momen plastis secara penuh merujuk pada Lampiran A, Persamaan A.4 yaitu:

$$M_f = \frac{\sigma_s t^3}{4} \dots \dots \text{Pers 11.30}$$

Dimana, σ_s adalah kekuatan luluh padatan busa. Momen ini berkaitan dengan pelepasan tegangan dengan $M \propto FL \propto \sigma L^3$. Kekuatan gagal:

$$\frac{\tilde{\sigma}_{pl}}{\sigma_{f,s}} = C \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{perilaku yang didominasi lentur}) \dots \dots \text{Pers 11.31}$$



Gambar 11.24 Busa menghasilkan struktur yang didominasi lenturan dengan modulus dan densitas rendah (a), kisi yang didominasi peregangan dengan modulus lebih besar dari busa pada densitas yang sama (b)

Busa elastomer runtuh bukan dengan peluluhan tetapi dengan bucking elastis, busa rapuh, dengan patah dinding sel (Gambar 11.25b dan c). Runtuh karena buckling (Lampiran B, Tabel B.5) dapat terjadi ketika tegangan melebihi $\tilde{\sigma}_{el}$ dan dinyatakan dengan:

$$\frac{\tilde{\sigma}_{el}}{E_s} \approx 0.05 \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)^2 \dots \dots \text{Pers 11.32}$$

Patahan sel dinding (Lampiran B.4) dapat terjadi ketika melebihi $\tilde{\sigma}_{cr}$:

$$\frac{\tilde{\sigma}_{cr}}{\sigma_{cr,s}} \approx 0.3 \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \text{Pers 11.33}$$

dimana $\sigma_{cr,s}$ adalah kekuatan fleksibel bahan dinding sel. Densifikasi, ketika tegangan meningkat dengan cepat, adalah murni pengaruh geometris. Sisi yang berlawanan dari sel dipaksa bersinggungan dan melentur atau menekuk tidak memungkinkan. Hal ini terjadi pada regangan ε_d (regangan densifikasi):

$$\tilde{\epsilon}_d \approx 1 - 1.4 \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right) \dots \dots \text{Pers 11.34}$$

Busa sering digunakan untuk bantalan dan kemasan dan untuk melindungi dari benturan. Energi berguna yang dapat diserap busa per volume satuan diperkirakan dengan:

$$\tilde{U} \approx \tilde{\sigma}_{pl} \tilde{\epsilon}_d$$

Di mana $\tilde{\sigma}_{pl}$ adalah tegangan lintasan tinggi, peluluhan, buckling, atau kekuatan retak busa. Perilaku ini tidak terbatas pada busa sel terbuka dengan struktur ideal, seperti yang ditunjukkan sebelumnya pada Gambar 11.22.

Sifat Termal. Panas spesifik busa diekspresikan dalam satuan J/m^3K diberikan oleh aturan campuran, menjumlahkan kontribusi dari padat dan gas. Hal yang sama berlaku untuk busa sel tertutup yang kaku tetapi belum tentu busa elastomerik densitas rendah karena perluasan gas dalam sel dapat memperluas busa itu sendiri, memberikan koefisien lebih tinggi.

Sel-sel di sebagian besar busa cukup kecil sehingga konveksi gas di dalamnya benar-benar ditekan. Konduktifitas termal busa adalah jumlah yang dikonduksikan melalui dinding sel dan udara. Sebagai pendekatan dapat digunakan persamaan di bawah ini:

$$\tilde{\lambda} = \frac{1}{3} \left(\left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right) + 2 \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \right) \lambda_s + \left(1 - \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right) \right) \lambda_a \dots \dots \text{Pers 11.36}$$

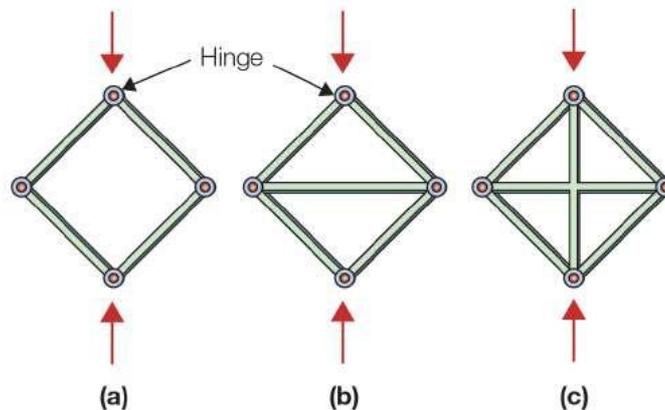
konduktifitas gas adalah 0.025 W/mK.

Sifat Listrik. Mengisolasi busa dapat menarik konstanta dielektrik rendah jatuh ke angka 1 karena densitas relatif menurun:

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 + (\epsilon_{r,s} - 1) \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right)$$

Kisi: Struktur Yang Didominasi Peregangan

Jika busa konvensional memiliki kekakuan rendah karena konfigurasi tepi sel memungkinkan untuk melentur, mungkin tidak untuk merancang konfigurasi lain di mana tepi sel dibuat untuk meregang? Struktur kisi mikro-truss membutuhkan kriteria stabilitas Maxwell.



Gambar 11.26 Rangka dengan sambungan pin di (a) mekanisme. Jika sambungannya dilas, tepi sel melentur. Sambungan pin, rangka triangulasi pada (b) kaku ketika dibebani batang melintang mengalami tarikan. Ketika sambungan rangka dilas, kekakuan dan kekuatannya tidak berubah. Rangka di (c) terlalu dibatasi.

Persamaan 11.38 adalah kondisi bahwa rangka yang diikat dengan sendi pin seperti pada Gambar 11.26.

$$M = b - 2j + 3 = 0 \dots \dots \text{Pers 11.38}$$

Dalam tiga dimensi persamaan ekivalen adalah:

$$M = b - 3j + 6 = 0 \dots \dots \text{Pers 11.38}$$

Memperkirakan Sifat Busa

Busa polietilena memiliki ρ 150 kg/m³. Densitas, modulus, kekuatan, dan konduktifitas termal polietilena tercantum dalam tabel. Apa yang dapat diharapkan sifat busa yang sama?

	Density ρ_s (kg/m ³)	Modulus Young E_s (GPa)	Flexural Strength $\sigma_{f,s}$ (MPa)	Thermal Conductivity λ_s (W/m.K)
High-molecular-weight polyethylene	950	0.94	33	0.195

Jawab:

Densitas busa relatif adalah:

$$\frac{\rho}{\rho_s} = 0.16$$

Dengan menggunakan Pers 29, 31, dan 36 diperoleh:

	Modulus Young \tilde{E}_s (GPa)	Flexural Strength $\tilde{\sigma}_{pl}$ (MPa)	Thermal Conductivity $\tilde{\lambda}$ (W/m.K)
High-molecular-weight polyethylene foam	0.024	0.63	0.04

Memperkirakan Properti Kisi

Kisi polietilena yang didominasi peregangan memiliki kepadatan ρ 150 kg/m³. Densitas, modulus, kekuatan, dan konduktifitas termal polietilena sama dengan yang tercantum dalam contoh terakhir. Apa yang dapat diharapkan sifat-sifat kisi?

Jawaban

Densitas relatif kisi adalah:

$$\frac{\rho}{\rho_s} = 0.16$$

Dengan menggunakan Persamaan 11.40, 41, dan 36 ditemukan:

	Modulus Young \tilde{E}_s (GPa)	Flexural Strength $\tilde{\sigma}$ (MPa)	Thermal Conductivity $\tilde{\lambda}$ (W/m.K)
High-molecular-weight polyethylene foam	0.05	1.8	0.04

Sifat Mekanik. Kriteria ini memberikan dasar untuk desain struktur mikrolattik yang efisien. Untuk struktur sel Gambar 11.22, Maxwell $M < 0$ dan bending mendominasi. Untuk struktur yang ditunjukkan pada Gambar 11.27, $M > 0$ dan berperilaku sebagai struktur yang hampir

isotropik dan didominasi peregangan. Rata-rata sepertiga batangnya membawa tarik ketika struktur dibebani dalam tegangan sederhana.

$$\frac{\tilde{E}}{E_s} \approx \frac{1}{3} \frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \text{ (isotropic stretch – dominated behavior) ... Pers 11.40}$$

Modulus adalah linear, tidak kuadrat, dalam densitas (Gambar 24b), memberikan struktur yang jauh lebih kaku pada densitas yang sama. Keruntuhan terjadi ketika tepi sel meluluh, memberikan tegangan runtuh:

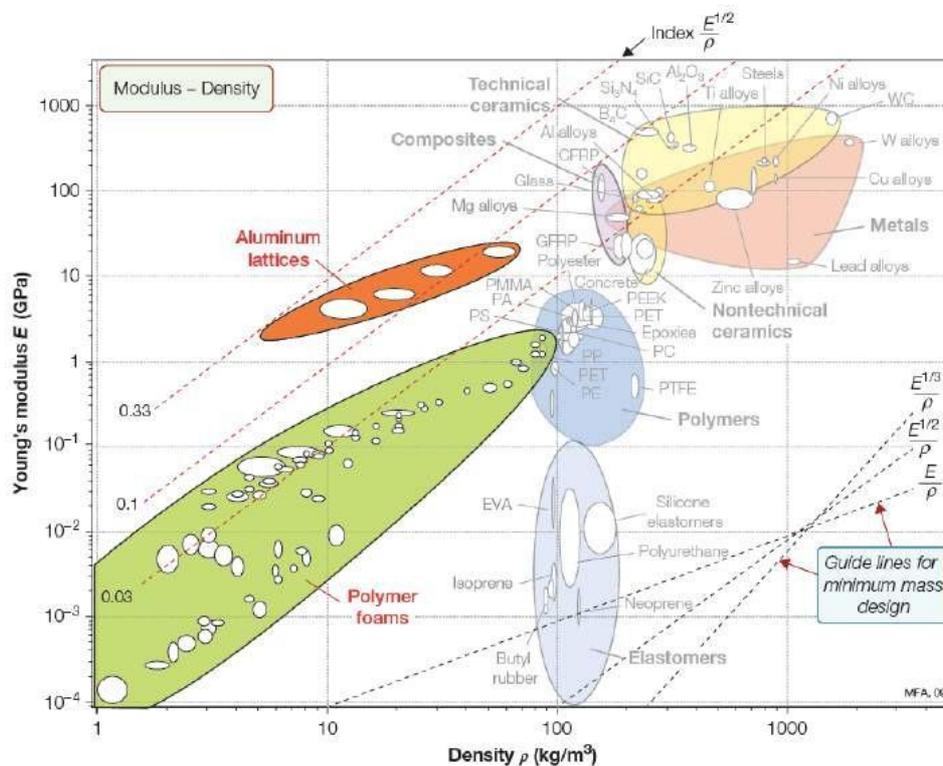
$$\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_{f,s}} \approx \frac{1}{3} \frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \text{ (isotropic stretch – dominated behavior) ... Pers 11.41}$$

Ini adalah batas atas dengan asumsi bahwa struts meluluh dalam tarikan atau kompresi ketika struktur dibebani. Jika struts ramping, maka terjadi buckling sebelum peluluhan. Kekuatan busa adalah:

$$\frac{\tilde{\sigma}_{el}}{E_s} \approx 0.2 \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_s} \right)^2 \text{ ... Pers 11.42}$$

Sifat Termal Dan Listrik. Perbedaan lentur/peregangan mempengaruhi sifat mekanik secara mendalam tetapi tidak berpengaruh terhadap sifat termal atau listrik.

Mengisi Ruang Properti Dengan Struktur Seluler. Gambar 11.28 menunjukkan diagram modulus-densitas ($E - \rho$) melalui ruang sifat material. Busa polimer diperluas sepanjang garis kemiringan 2, seperti yang diprediksi oleh Persamaan 11.29. Struktur kisi diperluas sepanjang garis kemiringan 1, seperti yang diprediksi Persamaan 11.40. Keduanya mengisi area $E - \rho$ yang tidak diisi oleh material padat.



Gambar 11.28 Busa dan struktur micro-truss adalah hibrida dari bahan dan ruang.

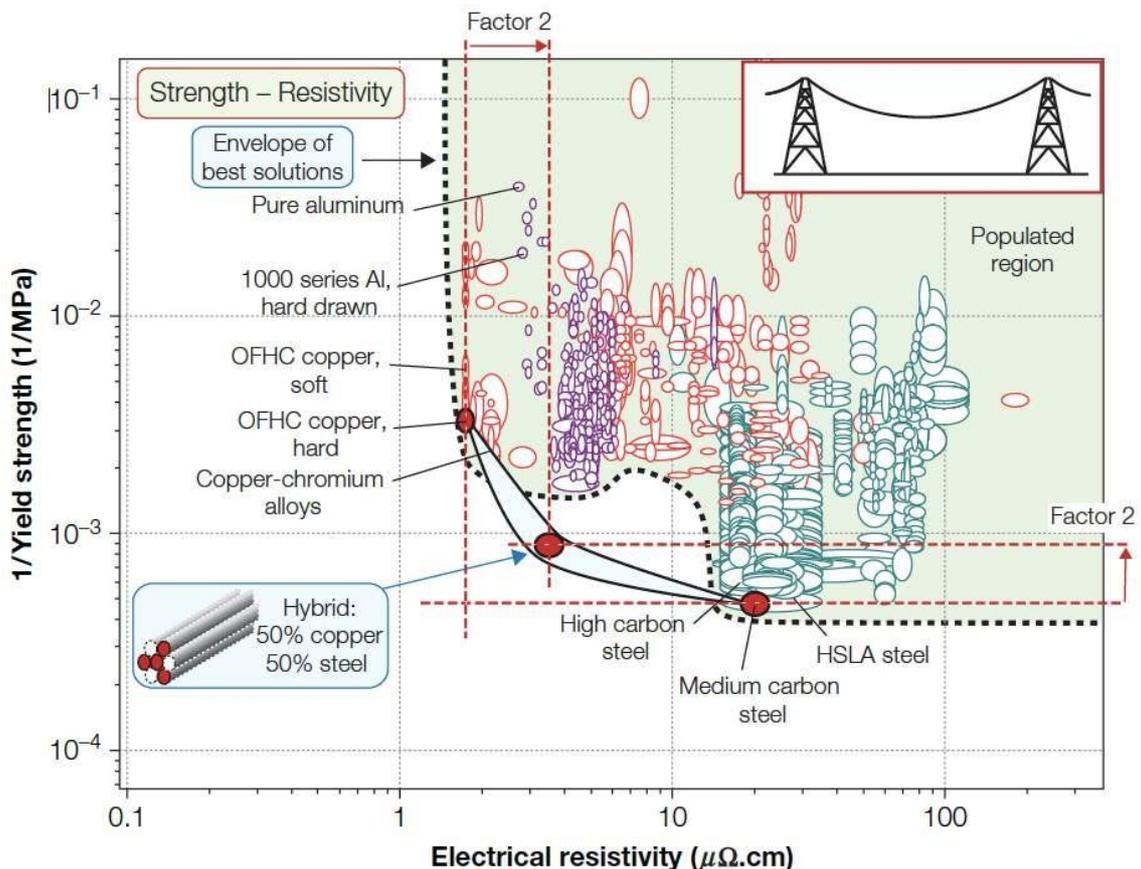
Struktur kisi mengisi area ke nilai indeks yang lebih tinggi:

$$\frac{E^2}{\rho} \text{ and } \frac{E^3}{\rho}$$

11.6 Struktur Segmentasi

Subdivisi sebagai Variabel Desain. Bentuk dapat digunakan untuk mengurangi atau meningkatkan kekakuan dan kekuatan lentur. Pegas, suspensi, kabel fleksibel, dan struktur lain yang harus lentur namun memiliki kekuatan tarik yang tinggi menggunakan bentuk untuk memberikan kekakuan lentur rendah. Hal ini dapat dicapai dengan membentuk material menjadi helai atau daun. Helai atau daun yang ramping melentur dengan mudah tetapi tidak meregang ketika bagian ditekuk: kabel dengan n-helai sedikit kaku dengan faktor $3/\pi n$ daripada penampang padat, panel dengan n-daun dengan faktor $1/n^2$.

Subdivisi memungkinkan penggabungan. Jika satu atau lebih segmen dapat diganti dengan material lain, penggabungan memiliki sifat material yang tidak dimiliki oleh material tunggal. Subdivisi dapat digunakan dengan cara lain: untuk memberikan toleransi kerusakan. Sebuah jendela kaca jika terkena proyektil, maka akan pecah.

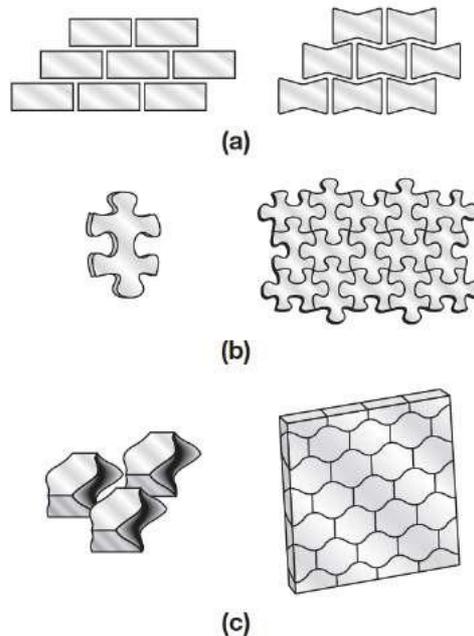


Gambar 11.29. Desain hibrida, satu dengan kekuatan tinggi dan konduktifitas listrik yang tinggi.

Dua benda memiliki toleransi kerusakan topologis: perbedaan satuan struktural dan saling mengunci antar satuan secara keseluruhan dapat membawa beban. Pengaturan seperti batu bata (Gambar 11.30a) membawa beban besar dan toleran terhadap kerusakan dalam kompresi dan geser, tetapi hancur di bawah tegangan tarik. Struktur seperti untai dan lapisan sangat toleran

terhadap tegangan tarik karena jika satu untai gagal, maka retakan tidak menembus ke sebelahnya. Konfigurasi teka-teki jigsaw (Gambar 11.30b) membawa tarikan, kompresi, dan geser dalam bidang, faktor konsentrasi tegangan sekitar $(R/t)^{0.5}$ di mana R adalah radius perkiraan unit dan r dari interlock.

Topologi tertentu yang mengandalkan kondisi batas kompresif atau kaku untuk membuat lapisan kontinu yang mentolerir gaya bidang dan momen lentur, seperti yang diilustrasikan Gambar 11.30c. Interlocking topologis semacam ini memungkinkan pembentukan lapisan kontinu yang dapat digunakan untuk cladding keramik atau lapisan untuk memberikan perlindungan permukaan.



Gambar 11.30 Contoh interlocking topologis: struktur diskrit dan tidak diikat yang membawa beban. (a) Rakitan batu bata blok persegi panjang membawa beban aksial, bukan tarik atau geser. (b) Interlocking 2 dimensi puxxle jigsaw membawa beban bidang. (c) Unit yang ketika dirakit ke dalam lapisan kontinu dan dijepit dalam batasan kaku di sekitar tepi lapisan, dapat melakukan beban bidang dan momen lentur.

11.7 Contoh kasus

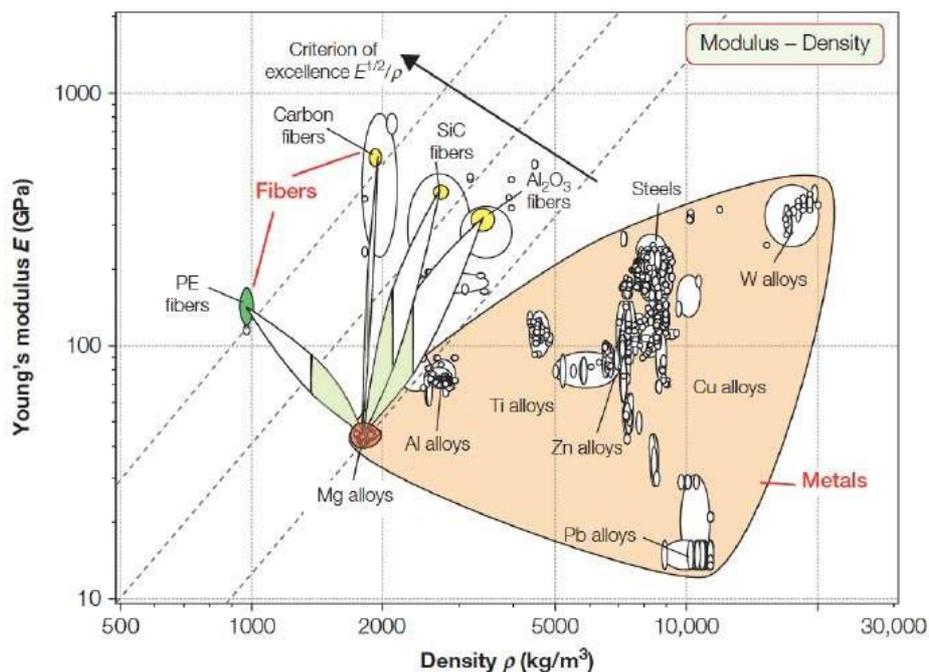
Desain Komposit Matriks Logam. Pernyataan umum dalam pembebanan adalah lenturan. Parameter dalam merancang material untuk membawa momen lentur pada berat minimum adalah indeks $E^{1/2}/\rho$. Paduan aluminium dan magnesium dapat memenuhi kriteria, tetapi paduan titanium dan baja tidak memenuhi kriteria. Bagaimana kinerja magnesium dapat ditingkatkan lebih lanjut? Tabel 11.5 menjelaskan persyaratan desain.

Tabel 11.5 Design requirement for the material of the panel	
Function	Light, stiff beam
Constraint	Magnesium matrix
Objective	Maximize stiffness to weight in bending (index $E^{1/2}/\rho$)
Free variable	Choice of reinforcement and volume fraction

Tabel 11.6 Superposition rules for composite density and modulus		
Property	Lower Bound	Upper Bound
Density	$\bar{\rho} = f\rho_r + (1 - f)\rho_m$ (exact)	
Modulus	$\tilde{E}_L = \frac{E_m E_r}{fE_m + (1 - f)E_r}$	$\tilde{E}_u = fE_r + (1 - f)E_m$

Metode. Gambar 11.31 menunjukkan diagram E dan ρ untuk logam dan serat. Paduan magnesium muncul di kiri ekstrim kotak "logam" merah. Kriteria keunggulan ditunjukkan sebagai satu set kontur diagonal, meningkat ke arah kiri atas. Magnesium peringkatnya sedikit lebih tinggi dari aluminium dan jauh lebih tinggi daripada titanium dan baja.

Tabel 11.6 meringkas aturan superposisi untuk densitas dan modulus yang diplot sebagai kotak kinerja yang memenuhi adalah empat komposit berbasis magnesium. Ada batas atas untuk fraksi volume, yang akan ditetapkan pada 0.5. Garis diagonal memplot kriteria keunggulan, $E^{1/2}/\rho$. Kombinasi dengan nilai tertinggi menawarkan keuntungan terbesar dalam kekakuan per berat unit.



Gambar 11.31 Kemungkinan komposit matriks magnesium.

Hasil. Dari Gambar 11.31 terlihat bahwa komposit magnesium dengan polietilena (PE) atau serat karbon adalah yang tertinggi, Mg-SiC kurang bagus, magnesium- Al_2O_3 tidak memiliki kelebihan apapun. Metode ini berpotensi memungkinkan mengeksplorasi alternatif dengan cepat.

Postscript. Komposit magnesium-PE terlihat bagus dan menjanjikan, tetapi tetap ada tantangan untuk benar-benar membuatnya. Serat polietilena sudah digunakan dalam tali dan kabel karena

kekakuan, kekuatan yang tinggi dan bobotnya rendah. Tetapi material tersebut akan hancur pada suhu di atas 120⁰C. Pengecoran atau sintering magnesium tidak dapat menjadi pilihan. Salah satu kemungkinan adalah menggunakan lembaran PE yang ditarik daripada serat, dan membuat laminasi multilayer dengan mengikat lembaran PE di antara lembaran magnesium. Kemungkinan kedua adalah mengeksplorasi komposit ternary yaitu menyebarkan bubuk magnesium dalam epoksi dan menggunakan campuran ini sebagai matriks yang mengandung serat PE. Jika tidak, maka pilihan akan kembali kepada magnesium-karbon.

Desain Dinding Refrijerasi. Panel kulkas atau freezer seperti itu pada Gambar 11.32 memiliki dua fungsi utama. Yang pertama adalah mengisolasi: maka konduktifitas termal melalui ketebalan harus diminimalkan. Yang kedua adalah mekanis: dinding memberikan kekakuan dan kekuatan, dan mendukung rak-rak. Pada ketebalan panel yang ditentukan, yang pertama dicapai dengan meminimalkan $\tilde{\lambda}$, di mana $\tilde{\lambda}$ adalah konduktifitas termal. Yang kedua dicapai dengan mencari material atau hibrida yang memaksimalkan \tilde{E}_{flex} di mana \tilde{E}_{flex} adalah modulus flexural. Perhatikan Tabel 11.7.

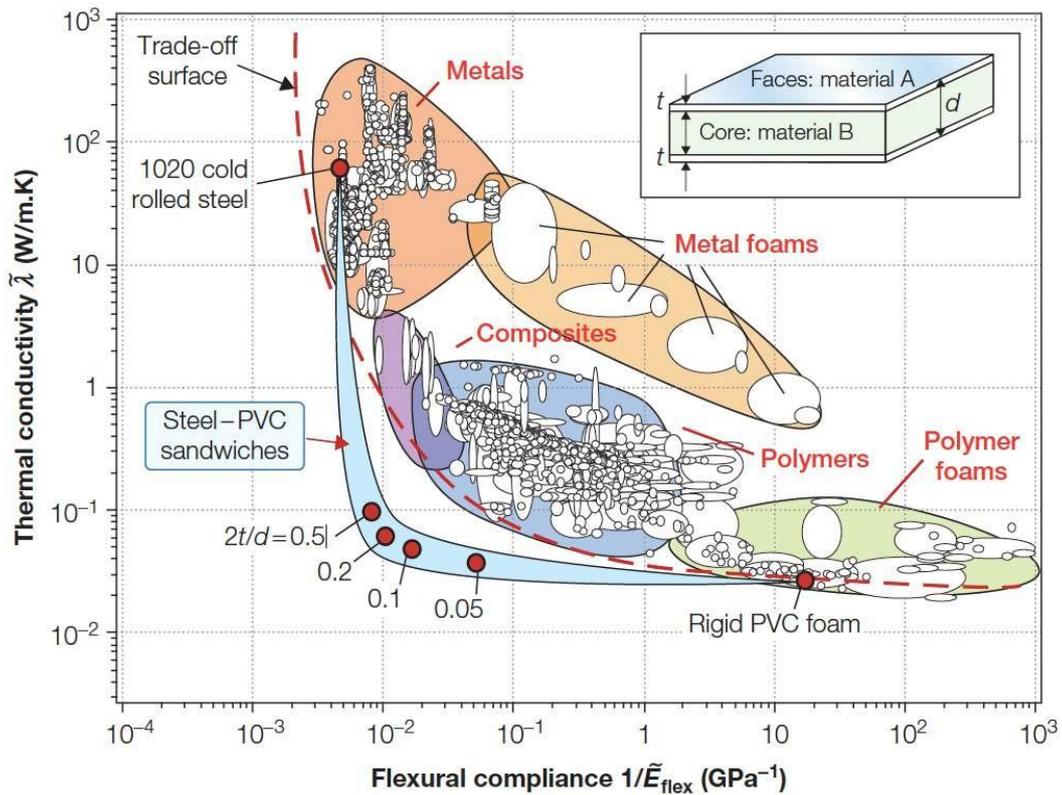


Gambar 11.32 Refrijerator. Panel unit kontainer harus mengisolasi, melindungi dari lingkungan eksternal, kaku dan kuat dalam beban lentur.

Tabel 11.7 Design requirement for the insulating panel	
Function	Insulating panel
Constraints	Sufficient stiffness to suppress vibration and support internal loads. Low cost Protect against environment Not too thick
Objective	Minimize heat transfer through thickness
Free variable	Material for faces and core, their relative thickness

Tabel 11.8 Superposition rules for sandwich stiffness and conductivity		
Property	Lower Bound	Upper Bound
Through-thickness conductivity	$\tilde{\lambda}_{\perp} = \left(\frac{2t/d}{\lambda_f} + \frac{(1 - 2t/d)}{\lambda_c} \right)^{-1}$ (exact)	
Flexural modulus	$\tilde{E}_{flex} = \left(1 - \left(1 - \frac{2t}{d} \right)^3 \right) E_f K_s$	$\tilde{E}_{flex} = \left(1 + \left(1 - \frac{2t}{d} \right)^3 \right) E_f$

Metode dan Hasilnya. Hibrida tipe "sandwich" dipilih dengan mengeksplorasi bagaimana kinerja berbagai kombinasi permukaan dan inti dibandingkan satu sama lain dan dengan material monolitik. Kuantitas \tilde{E}_{flex} untuk sandwich diberikan oleh Persamaan 11.18 dan konduktifitas termal melalui ketebalannya diberikan oleh Persamaan 11.24. Persamaan sederhana yang menggambarkannya gabungan dalam Tabel 11.8, di mana t adalah ketebalan lembar permukaan, d ketebalan panel, E_f modulus material permukaan, λ_f dan λ_c adalah konduktifitas permukaan dan inti, dan K_s faktor knock-down yang memungkinkan inti bergeser, idealnya sama dengan 1 (tidak ada geser) tetapi berpotensi serendah 0.5.



Gambar 11.33 Lintasan berbentuk L berwarna biru adalah kinerja permukaan baja, busa PVC sebagai inti sandwich. Kinerja termal diplot pada sumbu vertikal, kinerja mekanis pada sumbu horizontal. Keduanya harus diminimalkan.

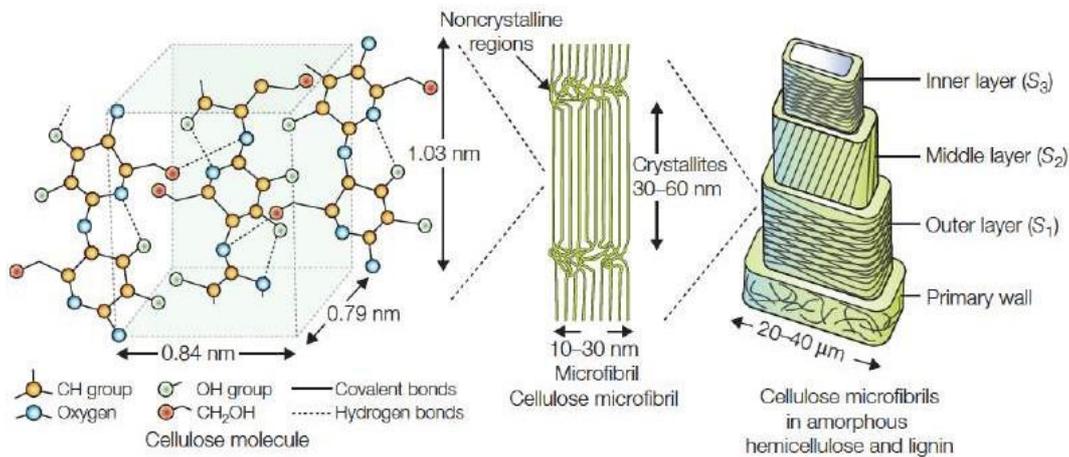
Gambar 11.33 menunjukkan plot konduktifitas termal $\tilde{\lambda}_L$ dan kesesuaian fleksibel \tilde{E}_{flex} . Perkiraan kinerja sandwich dengan permukaan baja lunak dan inti PVC dengan busa kaku diplot menggunakan persamaan dalam tabel untuk empat nilai ketebalan kulit hingga ke inti. Semua nilai terkandung dalam pita biru. Panel ini menawarkan kombinasi kekakuan dan isolasi yang tidak dapat dicocokkan dengan logam monolitik, komposit, polimer, atau busa. Kombinasi lain dari permukaan dan inti (permukaan aluminium atau SMC dengan inti busa polystyrene). Tidak ada kombinasi yang perform seperti kombinasi baja-polystyrene.

Postscript. Teknologi adesif mengalami kemajuan yang pesat selama dua dekade terakhir. Perekat yang tersedia dapat digunakan untuk mengikat dua bahan dengan kekuatan ikatan yang

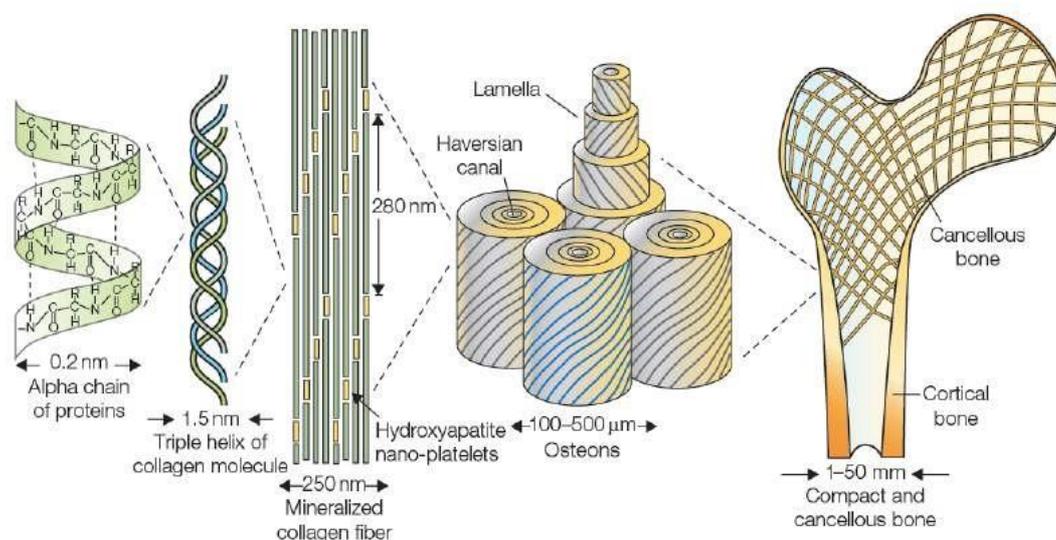
tinggi, meskipun beberapa perekat mahal. Rekayasa sandwich seharusnya tidak menjadi masalah.

Efisiensi Mekanis Material Alam. Bahan alami sangat efisien untuk memenuhi persyaratan kompleks. Kebutuhan untuk mendukung beban statis dan dinamis yang ditimbulkan oleh massa organisme atau dengan pembebanan angin, kebutuhan untuk menyimpan dan melepaskan energi elastis, kebutuhan untuk lenturan melalui sudut besar, dan kebutuhan untuk menahan tekuk dan patah.

Hampir semua material alami adalah hibrida, sebagian kecil polimer dan keramik. Dinding sel tanaman menggabungkan selulosa, hemicellulose, dan pektin, dan lignin. Jaringan hewani sebagian besar terdiri dari kolagen, elastin, keratin, kitin, dan mineral seperti garam kalsium atau silika. Kayu, bambu, dan palem terdiri dari serat selulosa dalam matriks lignin/hemicellulose, dibentuk untuk sel-sel prismatic berongga dengan ketebalan dinding yang bervariasi. Rambut, kuku, tanduk, wol, sisik reptil, dan kuku terbuat dari keratin sementara kutikula serangga mengandung kitin dalam matriks protein.



Gambar 11.34 Struktur hirarki kayu



Gambar 11.35 Struktur hirarki tulang

Bahan dominan cangkang moluska adalah kalsium karbonat, terikat dengan beberapa persen protein. Dentine, tulang, dan antler terbentuk dari "batu bata" hidroksiapatit yang disemen bersama dengan kolagen. Kolagen adalah elemen struktural dasar untuk jaringan lunak dan keras pada hewan, seperti tendon, ligamen, kulit, pembuluh darah, otot, dan tulang rawan, sering digunakan dengan cara yang mengeksploitasi bentuk.

Serat selulosa memiliki modulus Young yang hampir sama dengan benang pancing nilon, tetapi jauh di bawah baja. Matriks lignin-hemicellulose memiliki sifat yang sangat mirip dengan epoksi. Hidroksiapatit memiliki ketangguhan patah yang sebanding dengan keramik buatan manusia, artinya rapuh.

Hierarki konfigurasi yang membentuk kayu dan tulang diilustrasikan dalam Gambar 11.34 dan 11.35. Kekakuan, kekuatan, dan ketangguhan kayu sebagian besar berasal dari kekakuan, kekuatan, dan ketangguhan molekul selulosa, yang ditunjukkan di sebelah kiri Gambar 11.34. Mikrofibril kristal dibentuk dari molekul sekitar 30 hingga 60 nm panjangnya. Ini membentuk serat penguat lamellae, matriksnya lignin amorf dan hemicellulose. Tumpukan lamella dalam pola empat lapis dan orientasi serat (kanan) menjadi bahan struktural dinding sel. Fibril dinding sel utama saling berpotongan secara acak, seperti kain katun. Dalam lapisan berikutnya fibril sejajar dan dikemas secara kuat. Lapisan luar S_1 memiliki lamellae dengan bentuk spiral kanan dan kiri dari fibril. Lapisan lebih tebal S_2 memiliki fibril yang berorientasi di sepanjang sumbu sel. Lapisan terdalam S_3 memiliki lay-up seperti S_1 .

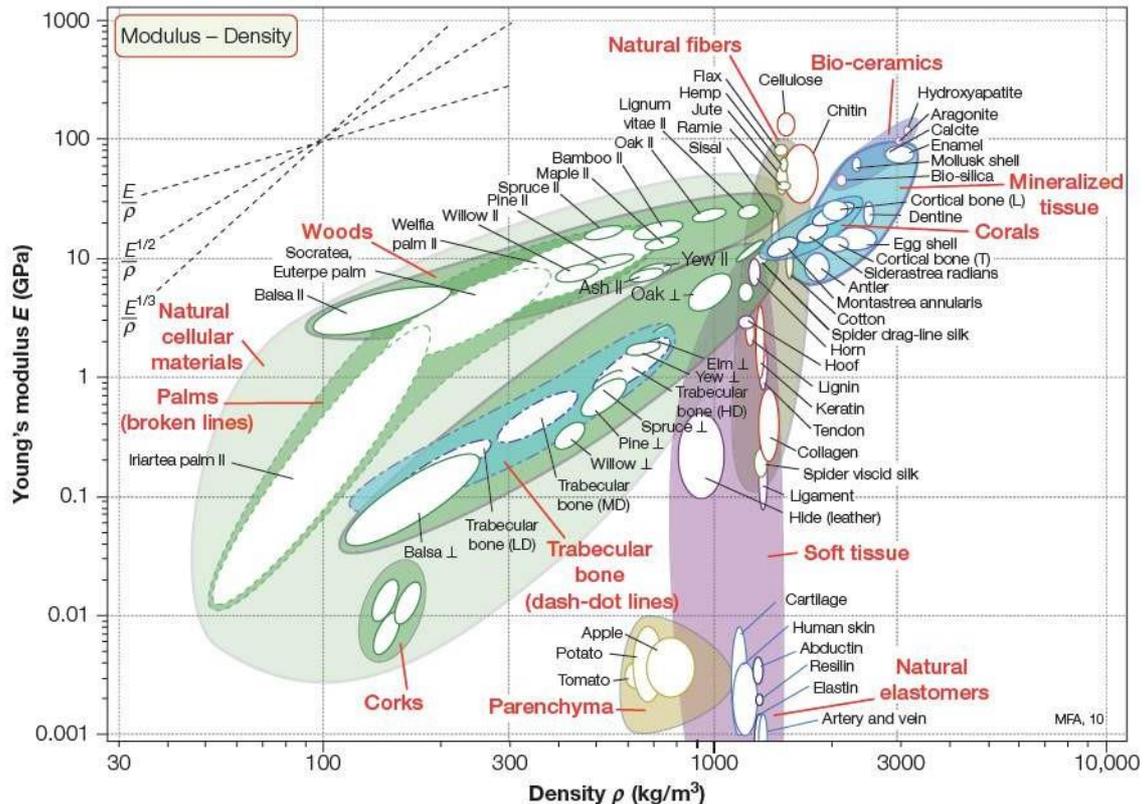
Dari Gambar 11.35, struktur triple-helical molekul kolagen ditunjukkan di sebelah kiri. Nanoplatelets hidroksiapatit disimpan di jaringan baru-baru ini dan peningkatan fraksi volume dari waktu ke waktu untuk menghasilkan osteon dewasa, dengan lay-up yang dipesan serat yang sangat mineral dengan kekuatan dan kekakuan untuk mendukung beban struktural yang harus dibawa tulang dalam organisme yang matang. Pada skala paling makro, tulang kompak hampir sepenuhnya padat memberikan struktur luar tulang utuh sementara tulang trabekuler yang sangat berpori mengisi vertebra, tulang seperti cangkang seperti tengkorak, dan ujung tulang panjang seperti tulang paha.

Sama seperti bahan rekayasa, blok bangunan bahan alami dapat dikelompokkan ke dalam kelas: *bio-keramik* (kalsit, aragonit, hidroksiapatit), *biopolimer* (blok bangunan organik: polisakarida, selulosa, protein kitin, kolagen, sutra, dan keratin), dan *elastomer alami* (elastin, resilin, abductin, kulit, arteri dan tulang rawan. Gabungan ini memberikan sifat hibrida, di antaranya *komposit dan sandwich* (tulang, antler, enamel, dentine, cangkang, mantel, dan karang), *struktur sel* (kayu, gabus, telapak tangan, bambu, tulang trabekuler), dan *struktur tersegmentasi* (sisik, rambut).

Bagan modulus Young-Densitas. Gambar 11.36 menunjukkan diagram untuk modulus Young dan densitas. Kelas material alami dikurung dalam blok besar, anggota kelas material ditampilkan sebagai gelembung yang lebih kecil di dalamnya. Data untuk kayu, palem, gabus, tulang trabekuler (seperti busa), dan karang. Serat alami (sutra, rami, jute, dan like) memiliki blok tersendiri, seperti halnya jaringan mineral (tulang, cangkang) dan jaringan lunak (ligamen, tulang rawan). Tulang trabekuler menunjukkan berbagai densitas, tiga gelembung untuk densitas tinggi (HD), densitas sedang (MD), dan densitas rendah (LD). Pedoman kekakuan

adalah E/ρ , $E^{1/2}/\rho$, dan $E^{1/3}/\rho$ masing-masing mewakili indeks material pada mode pembebanan tertentu.

Polimer alami dengan efisiensi tertinggi dalam tarikan, diukur dengan indeks E/ρ adalah selulosa, melebihi baja dengan faktor sekitar 2.6. Kayu, palem, dan bambu sangat efisien dalam lenturan dan tahan terhadap buckling, seperti yang ditunjukkan oleh nilai tinggi indeks lentur $E^{1/2}/\rho$ ketika dibebani sejajar dengan butiran. Itu untuk kayu balsa yang lima kali lebih besar dari baja.



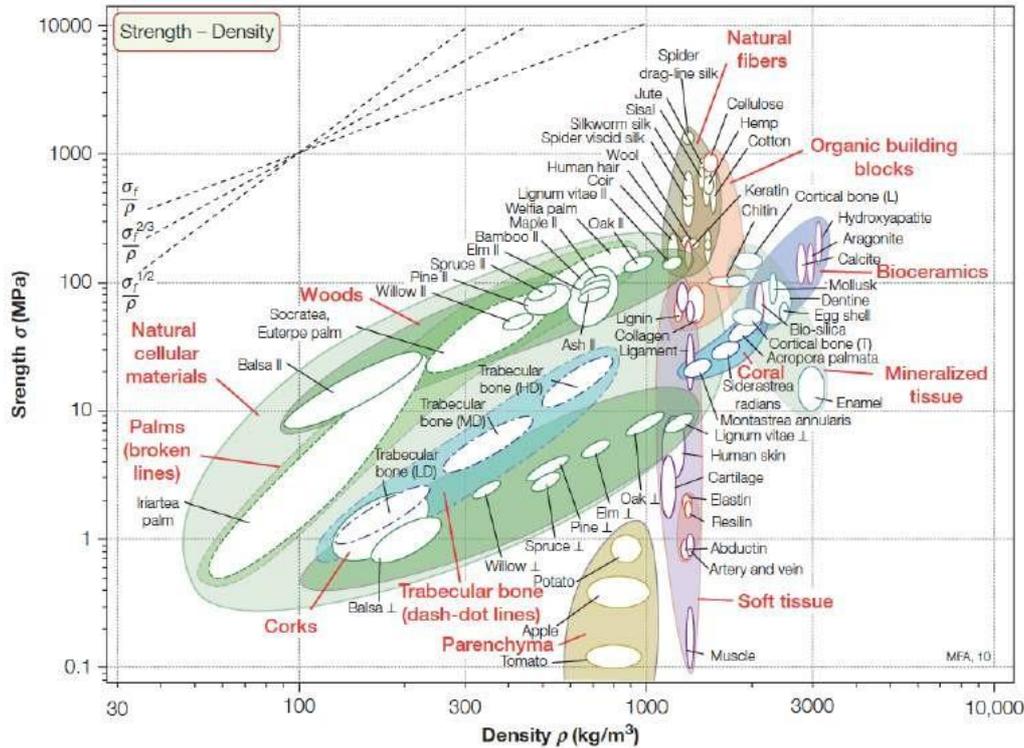
Gambar 11.36 Diagram properti material alami, plotting modulus Young-densitas. Garis panduan mengidentifikasi material yang efisien secara struktural yaitu ringan dan kaku.

Diagram Kekuatan Tarik-Densitas. Gambar 11.37 menunjukkan data kekuatan σ_f dan densitas ρ material alami. Skema pengkodean warna dan amplop sejajar dengan Gambar 11.36. Untuk keramik alami, kekuatan tarik diidentifikasi dengan kekuatan lentur (modulus pecah) dalam simbol balok lentur (T). Untuk polimer alami dan elastomer, kekuatannya adalah kekuatan tarik. Untuk bahan sel alami, tegangan tarik adalah tegangan pada lintasan tinggi. Kekuatan fleksibel tergantung pada sifat material. Kekuatannya sejajar (simbol ||) dan tegak lurus (simbol ⊥) terhadap orientasi serat atau butiran.

Evolusi kekuatan tarik akan mengarah ke material dengan nilai σ_f/ρ tinggi, di mana kekuatan lentur atau buckling diperlukan untuk menemukan material dengan $\sigma_f^{2/3}/\rho$. Sutra dan selulosa memiliki nilai σ_f/ρ tertinggi, sutra bahkan lebih tinggi daripada serat karbon. Serat

rami dan kapas memiliki nilai indeks tinggi. Bambu, palem, dan kayu memiliki nilai $\sigma_f^{2/3}/\rho$ yang tinggi, memberikan ketahanan terhadap kegagalan lentur.

Diagram Modulus Young-Kekuatan. Gambar 11.37 menunjukkan dua kombinasi material dengan nilai besar σ_f^2/E menyimpan energi elastis dan cocok untuk pegas. Material yang memiliki nilai besar σ_f/E memiliki ketahanan yang luar biasa. Sutra (termasuk sutra jaring laba-laba) memiliki efisiensi sangat tinggi, memiliki nilai σ_f^2/E yang melampaui baja atau karet pegas. Sawit (kayu kelapa) memiliki nilai indeks lebih tinggi dari kayu, yang memungkinkan palem dapat melentur ketika ada angin kencang.

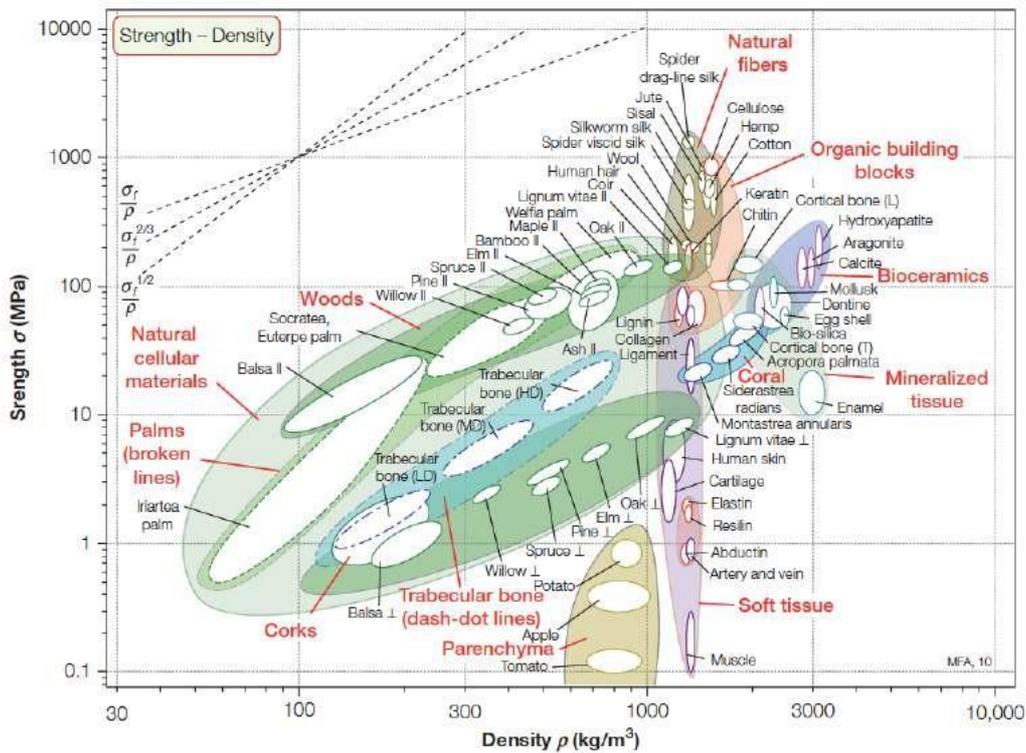


Gambar 11.37 Bagan properti material untuk bahan alami, desain kekuatan-densitas. Garis panduan mengidentifikasi material yang efisien, ringan dan kuat.

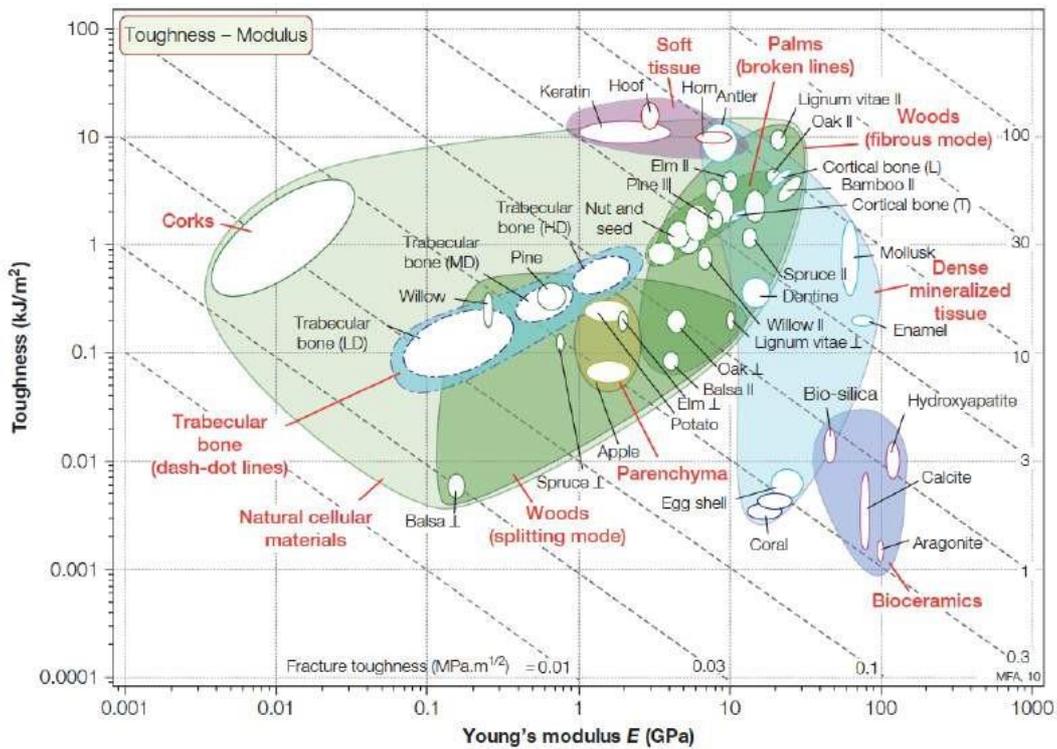
Diagram Ketangguhan-Modulus Young. Ketangguhan material adalah ketahanan terhadap perambatan retakan. Data ketangguhan dan modulus Young material alami ditunjukkan pada Gambar 11.38. Ketika komponen diperlukan untuk menyerap energi impact tanpa mengalami kegagalan, material terbaik memiliki nilai J_c terbesar, seperti antler, kuku, tanduk, bambu, dan kayu. Ketika komponen memiliki retakan harus membawa beban tanpa mengalami kegagalan, maka dipilih nilai ketangguhan patah $K_{Ic} \approx (EJ_c)^{1/2}$. Kontur diagonal miring dari kiri atas ke kanan bawah pada 11.38 menunjukkan nilai indeks ini. Cangkang moluska dan enamel gigi sangat menonjol.

Banyak material rekayasa (baja, aluminium, paduan) memiliki nilai J_c dan K_{Ic} yang jauh lebih tinggi daripada material alami terbaik. Ketangguhan keramik alami seperti nacre, dentine, tulang kortikal (padat), dan enamel adalah lebih tinggi daripada keramik rekayasa konvensional seperti alumina. Ketangguhan yang dimiliki berasal dari struktur tersegmentasi.

Postscript. Bahan alami berevolusi menjadi material yang efisien daripada penggunaan sebelumnya.



Gambar 11.38 Diagram sifat material alam, desain kekuatan-kepadatan. Garis panduan mengidentifikasi bahan yang efisien secara struktural yang ringan dan kuat.



Gambar 39 Diagram sifat material untuk material alami yang memplot ketangguhan-modulus Young. Garis panduan menunjukkan ketangguhan patah $(E_k)^{1/2}$ (MPa)^{1/2}.

DATA SOURCES FOR DOCUMENTATION

12.1 Pengantar

Informasi atribut material dapat ditelusuri secara terstruktur maupun tidak terstruktur. Sumber yang dapat digunakan antara lain: hard copy, software, dan internet. Dokumen hard-copy dapat ditemukan di perpustakaan-perpustakaan. Database komputer lebih sulit ditemukan: supplier terdaftar bersama alamat web-nya. Situs internet mudah ditemukan tetapi bisa membuat sulit untuk digunakan.

Bagian D.2 menganalogikan sumber informasi untuk keluarga dan kelas material, dengan komentar singkat jika sesuai. Bagian D.3 menyediakan titik awal untuk membaca tentang proses. Bagian D.4 mencantumkan perangkat lunak untuk material dan data proses, informasi, dan pilihan. Bagian D.5 mencantumkan situs Internet tambahan di mana informasi material seperti harga dapat ditemukan.

12.2 Sumber Informasi Material

12.2.1 All materials

Few hard-copy data sources span the full spectrum of materials and properties. Ten that, in different ways, attempt to do so are listed here.

1. Materials Selector (1997). Materials Engineering, Special Issue. Penton Publishing.
Tabular data for a broad range of metals, ceramics, polymers, and composites.
2. Waterman, N.A., & Ashby, M.F. (Eds.) (1996). The Chapman and Hall materials selector. Chapman and Hall.
A three-volume compilation of data for all materials, with selection and design guide. Basic reference work.
3. ASM handbook series (1980–2010). ASM International.
More than 20 volumes of information about materials, emphasizing metals. Now available online.
4. Bauccio, M.L. (Ed.) (1994). ASM engineered materials reference book (2nd ed.). ASM International.
Compact compilation of numeric data for metals, polymers, ceramics, and composites.
5. Materials selector and design guide (1974). Design Engineering, Morgan-Grampian Ltd.
Resembles the Materials Engineering Materials Selector, but less detailed and now rather dated.
6. Handbook of industrial materials (2nd ed.) (1992). Elsevier.
A compilation of data remarkable for its breadth: metals, ceramics, polymers, composites, fibers, sandwich structures, leather ...

7. Brady, G.S., & Clauser, H.R. (Eds.) (1986). *Materials handbook* (12th ed.). McGraw-Hill.
A broad survey, covering metals, ceramics, polymers, composites, fibers, sandwich structures, and more.
8. Cardarelli, F. (1999). *Materials handbook*. Springer-Verlag.
A remarkable compilation of material data spanning mechanical, thermal, and electrical properties of all material classes.
9. Goldsmith, A., Waterman, T.E., & Hirschhorn, J.J. (1961). *Handbook of thermophysical properties of solid materials*. MacMillan.
Thermophysical and thermochemical data for elements and compounds.
10. Bittence, J.C. (Ed.) (1994). *Guide to engineering materials producers*. ASM International.
A comprehensive catalog of addresses for material suppliers.

Internet sources of information on all classes of materials

1. ASM Handbooks online, www.asminternational.org/hbk/index.jsp
2. ASM Alloy center, www.asminternational.org/alloycenter/index.jsp
3. ASM Materials Information, www.asminternational.org/matinfo/index.jsp
4. A to Z of Materials, www.azom.com
5. Design InSite, www.designinsite.dk
6. Goodfellow, www.goodfellow.com
7. K&K Associate's thermal connection, www.tak2000.com
8. Corrosion Source (databases), www.corrosionsource.com
9. Material Data Network, www.matdata.net
10. Materials (Research): Alfa Aesar, www.alfa.com
11. MatWeb, www.matweb.com
12. MSC datamart, www.mssoftware.com
13. NASA Long Duration Exposure Facility, SETAS, <http://setas-www.larc.nasa.gov/LDEF/>
14. NPL MIDAS, midas.npl.co.uk/midas/index.jsp

12.2.2 All Metal

Metals and alloys conform to national and (sometimes) international standards. One consequence is the high quality of data. Hard-copy sources for metals data are generally comprehensive, well-structured, and easy to use.

1. ASM metals handbook (9th and 10th eds.) (1986, 1990). ASM International.
Basic reference work, continuously upgraded and expanded. The 10th edition contains Vol. 1: Irons and steels; Vol. 2: Non-ferrous alloys; Vol. 3: Heat treatment; Vol. 4: Friction, lubrication, and wear; Vol. 5: Surface finishing and coating; Vol. 6: Welding and brazing; Vol. 7: Microstructural analysis. More volumes have been released.
2. Baucio, M.L. (Ed.) (1993). *ASM metals reference book* (3rd ed.). ASM International.

- Consolidates data for metals from a number of ASM publications. Basic reference work.*
3. Smithells, C.J. (1992). Metals reference book (7th ed.). E.A. Brandes & G.B. Brook (Eds.). Butterworths.
A comprehensive compilation of data for metals and alloys. Basic reference work.
 4. Robb, C. (1990). Metals databook. The Institute of Metals.
A concise collection of data on metallic materials covered by U.K. specifications only.
 5. ASM guide to materials engineering data and information (1986). ASM International.
A directory of suppliers, trade organizations, and publications on metals.
 6. Bringas, J.E. (Ed.) (1992). The metals black book, vol. 1, steels. Casti Publishing.
A compact book of data for steels.
 7. Bringas, J.E. (Ed.) (1993). The metals red book, vol. 2, nonferrous metals. Casti Publishing.

Internet sources for two or more metals classes

1. ASM International Handbooks, www.asminternational.org/hbk/index.jsp
2. ASM International, Alloy Center, www.asminternational.org/alloycenter/index.jsp
3. Carpenter Technology home page, www.cartech.com
4. CASTI Publishing site catalog, www.casti-publishing.com/intsite.htm
5. CMW Inc. home page, www.cmwinc.com
6. Eurometaux, European Association of Metals, www.eurometaux.org
7. Materials (high performance): MatTech, www.mat-tech.com
8. Metsteel.com, www.metsteel.com
9. Rare earths: Pacific Industrial Development Corp., www.pidc.com
10. Rare metals: Stanford Materials Inc., www.stanfordmaterials.com
11. Refractory metals: Teledyne Wah Chang, www.twca.com

12.2.3 Nonferrous metals and alloys

In addition to the references listed in Section D2.2, the following sources give data for specific metals and alloys.

Pure metals

Most of the sources listed in the previous section contain some information on pure metals. However, the publications listed below are particularly useful in this respect.

1. Emsley, J. (1989). The elements. Oxford University Press.
A book aimed more at chemists and physicists than engineers, with good coverage of chemical, thermal, and electrical properties but not mechanical properties.
2. Brandes, E.A., & Brook, G.B. (Eds.) (1992). Smithells metals reference book (7th edition), Butterworth-Heinemann.
Data for the mechanical, thermal, and electrical properties of pure metals.
3. Goodfellow catalogue (1995–96). Goodfellow Cambridge Limited.

Useful though patchy data for mechanical, thermal, and electrical properties of pure metals in a tabular format. Free.

4. Alfa Aesar catalog (1995–96). Johnson Matthey Catalog Co. Inc.
Coverage similar to that of the Goodfellow catalogue. Free.
5. Samsonov, G.V. (Ed.) (1968). Handbook of the physiochemical properties of the elements. Oldbourne.
An extensive compilation of data from Western and Eastern sources. Contains a number of inaccuracies, but also contains a large quantity of data on the rarer elements, hard to find elsewhere.
6. Gschneidner, K.A. (1964). Physical properties and interrelationships of metallic and semimetallic elements. Solid State Physics, 16, 275–426.
Probably the best source of its time, this work is very well referenced, and full explanations are given of estimated or approximate data.

Internet sources

1. Winter, M. WebElements. University of Sheffield, www.webelements.com
A comprehensive source of information on all the elements in the Periodic Table. If it has a weakness, it is in the definitions and values of some mechanical properties.
2. Martindale's: physics web pages, www.martindalecenter.com/Calculators3A.html

Aluminum alloys

1. Aluminum standards and data. (1990). The Aluminum Association.
2. The properties of aluminum and its alloys. (1981). The Aluminum Federation.
3. Technical data sheets. (1993). ALCAN International Ltd.
4. Technical data sheets. (1993). ALCOA.
5. Technical data sheets. (1994). Aluminum Pechiney, France.

Internet sources

1. Aluminum Federation, www.alfed.org.uk
2. Aluminum World, www.sovereign-publications.com/aluminum.htm
3. International Aluminum Institute, www.world-aluminum.org

Babbitt Metal

The term “Babbitt Metal” denotes a series of lead-tin-antimony-bearing alloys, the first of which was patented in the United States by Isaac Babbitt in 1839. Subsequent alloys are all variations on his original composition.

ASTM Standard B23-83: White metal bearing alloys (known commercially as “Babbitt Metal”),

ASTM Annual Book of Standards, Vol. 02.04.

Beryllium

1. Designing with beryllium (1996). Brush Wellman.
2. Beryllium optical materials (1996). Brush Wellman.

Internet sources

Brush Wellman, www.brushwellman.com

Cadmium

Cadmium production, properties and uses (1991). International Cadmium Association.

Chromium

Castings, chromium-nickel alloy, ASTM Standard A560-89: ASTM Annual Book of Standards, 01(02).

Cobalt alloys

Betteridge, W. (1982). Cobalt and its alloys. Ellis Horwood.
A good general introduction to the subject.

Columbium alloys

See Niobium alloys.

Copper alloys

1. ASM Metals Handbook (10th ed.) (1990). ASM International
2. West, E.G. (1979). The selection and use of copper-rich alloys. Oxford University Press for the Design.
Council, the British Standards Institution, and the Council of Engineering Institutions.
3. Copper Development Association data sheets, 26 (1988), 27 (1981), 31 (1982), 40 (1979), and 82 (1982). Copper Development Association, and The Copper Development Association.
4. Megabytes on coppers (1994). The Copper Development Association and Granta Design Limited.
5. Smithells metals reference book, (7th ed.). (1992). E.A. Brandes & G.B. Brook (Eds.). Butterworth-Heinemann.

Internet sources

1. Copper Development Association, www.cda.org.uk
2. Copper page, www.copper.org

Gold and dental alloys

1. Gold: Art, science and technology (1992). Interdisciplinary Science Reviews, 17(3). The Institute of Materials, ISSN 0308-0188.
2. Focus on gold (1992). Interdisciplinary Science Reviews, 17(4). The Institute of Materials, ISSN 0308-0188.
3. ISO Standard 1562: Dental casting gold alloys (1993). International Standards Organization.
4. ISO Standard 8891: Dental casting alloys with Noble metal content of 25% up to but not including 75% (1993). International Standards Organization.

Internet sources

1. Goodfellow Metals, www.goodfellow.com
Supplier of pure and precious metals, mainly for laboratory use. Website contains price and property information for its entire stock.

2. Jeneric Pentron, Casting alloys, www.jeneric.com/casting
An informative commercial site. An extensive source of information, both for natural biological materials and for metals used in dental treatments.
3. Rand Refinery Limited, Chamber of Mines website, www.bullion.org.za/associates/rr.htm
Contains useful information on how gold is processed to varying degrees of purity.

Indium

The Indium Info Center, Indium Corp. of America. www.indium.com

Lead

1. ASTM Standard B29-79: Pig lead. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
2. ASTM Standard B102-76: Lead- and tin-alloy die castings. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
3. ASTM Standard B749-85: Lead and lead alloy strip, sheet, and plate products, ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
4. Lead for corrosion resistant applications. Lead Industries Association.
5. ASM metals handbook (9th ed.). (1986). Vol. 2, 500–510.
See also Babbitt Metal (listed previously).

Internet sources

1. Lead Development Association International, www.ldaint.org
2. India Lead Zinc Development Association, www.ilzda.com

Magnesium alloys

1. Technical data sheets (1994). Magnesium Electron Ltd.
2. Technical literature (1994). Magnesium Corp. of America.

Molybdenum

1. ASTM Standard B386-85: Molybdenum and molybdenum alloy plate, sheet, strip and foil.
ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
2. ASTM Standard B387-85: Molybdenum and molybdenum alloy bar, rod and wire.
ASTM Annual
Book of Standards, 02(04).

Nickel

A major data source for nickel and its alloys is the Nickel Development Institute (NIDI), a global organization with offices on every continent except Africa. NIDI freely gives away large quantities of technical reports and data compilations, not only for nickel and high-nickel alloys but also for other nickel-bearing alloys, such as stainless steel.

1. ASTM Standard A297-84: Steel castings, iron-chromium and iron-chromium-nickel, heat resistant, for general application. ASTM Annual Book of Standards, 01(02).

2. ASTM Standard A344-83, Drawn or rolled nickel-chromium and nickel-chromium-iron alloys for electrical heating elements. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
3. ASTM Standard A494-90: Castings, nickel and nickel alloy. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
4. ASTM Standard A753-85: Nickel-iron soft magnetic alloys. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).
5. Betteridge, W. (1984). Nickel and its alloys. Ellis Horwood.
A good introduction to the subject.
6. INCO (1995). High-temperature, high-strength nickel base alloys. Nickel Development Institute.
Tabular data for over 80 alloys.
7. Elliott, P. (1990). Practical guide to high-temperature alloys. Nickel Development Institute.
8. INCO (1978). Heat & corrosion resistant castings. Nickel Development Institute.
9. INCO (1969). Engineering properties of some nickel copper casting alloys. Nickel Development Institute.
10. INCO (1968). Engineering properties of IN-100 alloy. Nickel Development Institute. INCO (1969).
Engineering properties of nickel-chromium alloy 610 and related casting alloys. Nickel Development Institute.
11. INCO (1968). Alloy 713C: technical data. Nickel Development Institute.
12. INCO (1981). Alloy IN-738: technical data. Nickel Development Institute.
13. INCO (1976). 36% nickel-iron alloy for low temperature service. Nickel Development Institute.
14. ASTM Standard A658 (discontinued 1989): Pressure vessel plates, alloy steel, 36 percent nickel.
ASTM Annual Book of Standards, pre-1989 editions.
15. ASM Metals Handbook (9th ed.) (1986). Vol. 3, 125–178.

Internet sources

1. Carpenter Technology Corp, www.carttech.com
2. Nickel Development Institute, www.nidi.org
3. Special Metals Corp., www.specialmetals.com
4. Steel & nickel based alloys, www.superalloys.co.uk

Niobium (Columbium) alloys

1. ASTM Standard B391-89: Niobium and niobium alloy ingots. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
2. ASTM Standard B392-89: Niobium and niobium alloy bar, rod and wire. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
3. ASTM Standard B393-89: Niobium and niobium alloy strip, sheet and plate. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).

4. ASTM Standard B652-85: Niobium-hafnium alloy ingots. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
5. ASTM Standard B654-79: Niobium-hafnium alloy foil, sheet, strip and plate. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
6. ASTM Standard B655-85: Niobium-hafnium alloy bar, rod and wire. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).

Internet sources

Husted, R., Los Alamos National Laboratory. www-c8.lanl.gov/Infosys
An overview of Niobium and its uses.

Palladium

1. ASTM Standard B540-86: Palladium electrical contact alloy. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).
2. ASTM Standard B563-89: Palladium-silver-copper electrical contact alloy. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).
3. ASTM Standard B589-82: Refined palladium. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
4. ASTM Standard B683-90: Pure palladium electrical contact material. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).
5. ASTM Standard B685-90: Palladium-copper electrical contact material. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).
6. ASTM Standard B731-84: 60% palladium-40% silver electrical contact material. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).

Internet sources

1. Jeneric Pentron, Casting alloys. www.jeneric.com/casting
An informative commercial site, limited to dental alloys.
2. Goodfellow Metals, www.goodfellow.com
Supplier of pure and precious metals, mainly for laboratory use. Website contains price and property information for its entire stock.

Platinum alloys

1. ASTM Standard B684-81: Platinum-iridium electrical contact material. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).
2. Elkoniom Series 400 datasheets, CMW.
3. ASM Metals Handbook (9th ed.) (1986). Vol. 2, 688–698.

Silver alloys

1. ASTM Standard B413-89: Refined silver. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
2. ASTM Standard B617-83: Coin silver electrical contact alloy. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).
3. ASTM Standard B628-83: Silver-copper eutectic electrical contact alloy. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).

4. ASTM Standard B693-87: Silver-nickel electrical contact materials. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).
5. ASTM Standard B742-90: Fine silver electrical contact fabricated material. ASTM Annual Book of Standards, 03(04).
6. ASTM Standard B780-87: 75% silver, 24.5% copper, 0.5% nickel electrical contact alloy. *ASTM Annual Book of Standards, 03(04)*.
7. Elkonium Series 300 datasheets (1996). CMW.
8. Elkonium Series 400 datasheets (1996). CMW.

Internet sources

1. The Silver Institute, www.silverinstitute.org
2. Jeneric Pentron, Casting alloys. www.jeneric.com/casting
An informative commercial site, limited to dental alloys.
3. Goodfellow Metals, www.goodfellow.com
Supplier of pure and precious metals, mainly for laboratory use. Website contains price and property information for its entire stock.

Tantalum alloys

1. ASTM Standard B365-86: Tantalum and tantalum alloy rod and wire. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
2. ASTM Standard B521-86: Tantalum and tantalum alloy seamless and welded tubes. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
3. ASTM Standard B560-86: Unalloyed tantalum for surgical implant applications. ASTM Annual Book of Standards, 15(01).
4. ASTM Standard B708-86: Tantalum and tantalum alloy plate, sheet and strip. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
5. Tantalum data sheet (1996). The Rembar Company.
6. ASM Handbook (9th ed.) (1986). Vol. 3, 323–325, 343–347.

Tin alloys

1. ASTM Standard B32-89: Solder metal. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
2. ASTM Standard B339-90: Pig tin. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
3. ASTM Standard B560-79: Modern pewter alloys. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
4. Barry, B.T.K. & Thwaites, C.J. (1983). Tin and its alloys and compounds. Ellis Horwood.
5. ASM Metals Handbook (9th ed.) (1986). Vol. 2, 613–625
See also Babbitt Metal (earlier).
6. Tin Research Association, www.tintechnology.com

Titanium alloys

1. Technical data sheets (1993). Titanium Development Association.
2. Technical data sheets (1993). The Titanium Information Group.
3. Technical data sheets (1995). IMI Titanium.

Internet sources

1. Titanium Information Group, www.titaniuminfogroup.co.uk
2. The International Titanium Association, www.titanium.org
This association site has a large list of member companies and comprehensive information on titanium and its alloys.

Tungsten alloys

1. ASTM Standard B777-87: Tungsten base, high-density metal. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
2. Yih, S.W.H. & Wang, C.T. (1979). Tungsten. Plenum Press.
3. ASM Metals Handbook (9th ed.) (1986). Vol. 7, p. 476.
4. Tungsten data sheet (1996). The Rembar Company.
5. Royal Ordnance speciality metals datasheet (1996). British Aerospace Defence Ltd.
6. CMW datasheets (1996). CMW.

Internet sources

North American Tungsten, www.northamericantungsten.com

Uranium

1. Uranium Information Centre, Australia, www.uic.com.au
2. UXC Jan 96 uranium indicator update, www.uxc.com/review/uxc_prices/asp

Vanadium

Teledyne Wah Chang (1996). Vanadium brochure. TWC.

Zinc

1. ASTM Standard B6-87: Zinc. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
2. ASTM Standard B69-87: Rolled zinc. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
3. ASTM Standard B86-88: Zinc-alloy die castings. ASTM Annual Book of Standards, 02(02).
4. ASTM Standard B418-88: Cast and wrought galvanic zinc anodes. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
5. ASTM Standard B791-88: Zinc-aluminum alloy foundry and die castings. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
6. ASTM Standard B792-88: Zinc alloys in ingot form for slush casting. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
7. ASTM Standard B793-88: Zinc casting alloy ingot for sheet metal forming dies. ASTM Annual Book of Standards, 02(04).
8. Goodwin, F.E., & Ponikvar, A.L. (Eds.) (1989). Engineering properties of zinc alloys (3rd ed.). International Lead Zinc Research Organization.
An excellent compilation of data, covering all industrially important zinc alloys.
9. Chivers, A.R.L. (1981). Zinc diecasting. Engineering Design Guide, 41, OUP.
A good introduction to the subject.
10. ASM Metals Handbook (9th ed.) (1986). Properties of zinc and zinc alloys. Vol.2, 638–645.

Internet sources

1. International Zinc Association, www.iza.com
2. Zinc Industrias Nacionales S.A.-Peru, www.zinsa.com
3. Zinc: Eastern Alloys, www.eazall.com
4. India Lead Zinc Development Association, www.ilzda.com

Zirconium

1. ASTM Standard B350-80: Zirconium and zirconium alloy ingots for nuclear application. *ASTM Annual Book of Standards, 02(04)*.
2. ASTM Standards B352-85, B551-83, and B752-85: Zirconium and zirconium alloys. *ASTM Annual Book of Standards, 02(04)*.
3. Teledyne Wah Chang (1996). *Zircadyne: properties & applications*. TWC
4. ASM Metals Handbook (9th ed.) (1986). Vol. 2, 826–831.

12.2.4 Ferrous metals

Ferrous metals are probably the most thoroughly researched and documented class of materials. Nearly every developed country has its own system of standards for irons and steels. Recently, continental and worldwide standards have been developed, which have achieved varying levels of acceptance. There is a large and sometimes confusing literature on the subject. This section is intended to provide the user with a guide to some of the better information sources. Ferrous metals, general data sources.

1. Bringas, J.E. (Ed.) (1995). *The metals black book – ferrous metals* (2nd ed.). CASTI Publishing.
An excellent short reference work.
2. ASM Metals Handbook (10th ed.) (1990). Vol. 1. ASM International.
Authoritative reference work for North American irons and steels.
3. ASM Metals Handbook (desk ed.) (1985). ASM International.
A summary of the multi-volume ASM Metals Handbook.
4. Wegst, C.W. (2010) *Stahlschlüssel* (in English: *Key to steel*). Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH.
Published every three years, in German, French, and English. Excellent coverage of European products and manufacturers.
5. Woolman, J., & Mottram, R.A. (1966). *The mechanical and physical properties of the British standard in steels*. Pergamon Press.
Still highly regarded, but based around a British Standard classification system that has been officially abandoned.
6. Brandes, E.A., & Brook, G.R. (Eds.) (1992). *Smithells metals reference book* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
An authoritative reference work, covering all metals.
7. Waterman, N.A. & Ashby, M.F. (1996). *Materials Selector*. Chapman and Hall.
Covers all materials; irons and steels are in vol. 2.
8. Sharpe, C. (Ed.) (1993). *Kempe's engineering year book* (98th ed.). Benn.
Updated each year; has good sections on irons and steels.

Irons and steels standards

Increasingly, national and international standards organizations are providing a complete catalog of their publications on the web. Two of the most comprehensive printed sources are listed here.

1. Iron and steel specifications (9th ed.) (1998). British Iron and Steel Producers Association (BISPA).
Comprehensive tabulations of data from British Standards on irons and steels, as well as some information on European and North American standards. The same information is available on a searchable CD.
2. ASTM Annual Book of Standards, Vols. 01(01) through 01(07).
The most complete set of American irons and steels standards. Summaries of the standards can be found on the web at www.astm.org

Cross-referencing of similar international standards and grades

It is difficult to match, even approximately, equivalent grades of iron and steel between countries. No coverage of this subject can ever be complete, but the references listed here are helpful.

1. Gensure, J.G., & Potts, D.L. (1988). International metallic materials cross reference (3rd ed.). Genium Publishing.
Comprehensive worldwide coverage of the subject, well indexed.
2. Bringas, J.E. (Ed.) (1995). The metals black book—ferrous metals (2nd ed.). CASTI Publishing.
Easy-to-use tables for international cross-referencing. (See “General” section for more information.)
3. Unified numbering system for metals and alloys (2nd ed.), (1977). Society of Automotive Engineers.
An authoritative reference work, providing a unifying structure for all standards published by U.S. organizations. No coverage of the rest of the world.
4. Iron and steel specifications (7th ed.) (1989). British Steel.
Lists “Related Specifications” for France, Germany, Japan, Sweden, U.K. and U.S.A.

Cast irons

1. Scholes, J.P. (1979). The selection and use of cast irons. Engineering Design Guides, OUP.
2. Angus, H.T. (1976). Cast iron: physical and engineering properties. Butterworths.

Cast irons, American standards

These can all be found in the Annual Book of ASTM Standards, 01(02).

1. ASTM A220M-88: Pearlitic malleable iron, www.astm.org
2. ASTM A436-84: Austenitic gray iron castings; www.astm.org
3. ASTM A532: Abrasion-resistant cast irons; www.astm.org
4. ASTM A602-70 (reapproved 1987): Automotive malleable iron castings.

Cast irons, international standards

These are available from the ISO Central Secretariat, Geneva, Switzerland.

1. ISO 185:1988 Grey cast iron – classification.
2. ISO 2892:1973 Austenitic cast iron.
3. ISO 5922:1981 Malleable cast iron.

Cast irons, British standards

Compared with steels, there are relatively few standards for cast iron, which makes it feasible to list them all. Standards are available from BSI Customer Services, London.

1. BS 1452:1990 Flake graphite cast iron.
2. BS 1591:1975 Specification for corrosion resisting high silicon castings.
3. BS 2789:1985 Iron castings with spheroidal or nodular graphite.
4. BS 3468:1986 Austenitic cast iron.
5. BS 4844:1986 Abrasion resisting white cast iron.
6. BS 6681:1986 Specification for malleable cast iron.

Carbon and low alloy steels

1. ASM metals handbook (10th ed.) (1990). Vol. 1. ASM International.
Authoritative reference work for North American irons and steels.
2. Fox, J.H.E. (1980). An introduction to steel selection: part 1, carbon and low-alloy steels.
Engineering Design Guide, no. 34. Oxford University Press.

Stainless steels

1. ASM metals handbook (10th ed.) (1990). Vol. 1. ASM International.
Authoritative reference work for North American irons and steels.
2. Elliott, D., & Tupholme, S.M. (1981). An introduction to steel selection: part 2, stainless steels.
Engineering Design Guide, no. 43. Oxford University Press.
3. Peckner, D., & Bernstein, I.M. (1977). Handbook of stainless steels. McGraw-Hill.
4. Design guidelines for the selection and use of stainless steel (1991). Designers' Handbook Series, No. 9014. Nickel Development Institute.
The Nickel Development Institute (NIDI) is a worldwide organization that gives away a large variety of free literature about nickel-based alloys, including stainless steels. NIDI European Technical Information Centre.

General Internet sites for ferrous metals

1. British Constructional Steel Work Association, www.steelconstruction.org
2. International Iron & Steel Institute, www.worldsteel.org
3. Iron & Steel Trades Confederation, www.istc-tu.org
4. National Association of Steel Stock Holders, www.nass.org.uk
5. Steel Manufacturers Association, www.steelnet.org
6. Steel: Bethlehem Steel, www.bethsteel.com (steel)
7. Steel: Corus Group, www.corusgroup.com(steel)
8. Steel: Automotive Steel Library, www.autosteel.org(steel)

9. Steel: Great Plains Stainless, [www.gpss.com\(steel\)](http://www.gpss.com(steel))
10. SteelSpec, [www.steel-spec.org.uk/index.htm\(steel\)](http://www.steel-spec.org.uk/index.htm(steel))

12.2.5 Polymers and elastomers

Polymers are not subject to the same strict specifications as metals. Data tend to be producer-specific. Sources are consequently scattered, incomplete, and poorly presented. Saechtling is the best; although no single hard-copy source is completely adequate, all those listed here are worth consulting. See also Section D.4, Databases and Expert Systems as software; some are good on polymers.

1. Saechtling, H. (Ed.) (1983). *Saechtling: International plastics handbook*. MacMillan. *The most comprehensive of the hard-copy data sources for polymers.*
2. Seymour, R.B. (1987). *Polymers for engineering applications*. ASM International. *Property data for common polymers. A starting point, but insufficient detail for accurate design or process selection.*
3. Murphy, J (Ed.) (1991). *New horizons in plastics, a handbook for design engineers*. WEKA Publishing.
4. *ASM engineered materials handbook, Vol 2. engineering plastics (1989)*. ASM International.
5. Harper, C.A. (Ed.) (1975). *Handbook of plastics and elastomers*. McGraw-Hill.
6. *International plastics selector, plastics (9th ed.) (1987)*. International Plastics Selector.
7. Domininghaus, H. (Ed.) (1992). *Die kunststoffe and ihre eigenschaften*. VDI Verlag.
8. Van Krevelen, D.W. (1990). *Properties of polymers (3rd ed.)*. Elsevier. *Correlation of properties with structure; estimation from molecular architecture.*
9. Bhowmick, A.K., & Stephens, H.L. (1988). *Handbook of elastomers*. Marcel Dekker.
10. *ICI technical service notes (1981)*. ICI Plastics Division, Engineering Plastics Group.
11. *Technical data sheets (1995)*. Malaysian Rubber Producers Research Association. *Data sheets for numerous blends of natural rubber.*
12. Ossvald, T.A., Baur, E., Brinkmann, F., Oberbach, K., & Schmachtenberg, E. (2006). *International plastics handbook*, Carl Hanser Verlag.

Software and Internet sources

1. CAMPUS Plastics database, www.campusplastics.com
2. CES Polymers database, www.grantadesign.com
3. GE Plastics, www.ge.com/en/company/businesses/ge_plastics.htm
4. Harboro Rubber Co., www.harboro.co.uk
5. IDES Resin Source, www.ides.com
6. MERL, www.merl-ltd.co.uk
7. Plastics.com, www.plastics.com
8. Matweb.com, www.matweb.com
9. M-base engineering, www.m-base.de/main

12.2.6 Ceramics and glasses

Sources of data for ceramics and glasses, other than the suppliers' data sheets, are limited. Texts and handbooks—for example, the ASM's (1991) Engineered Materials Handbook, Vol. 4, Morell's (1985) compilations, Neville's (1996) book on concrete, Boyd and Thompson's (1980) Handbook on Glass, and Sorace's (1996) treatise on stone are useful starting points. The CES Ceramics Database contains recent data for ceramics and glasses. In the end, however, it is the manufacturer to whom one has to turn: The data sheets for their products are the most reliable sources of information.

Ceramics and ceramic-matrix composites

1. ASM engineered materials handbook, Vol. 4, Ceramics and glasses (1991). ASM International.
2. Waterman, N., & Ashby, M.F. (Eds.) (1996). Materials selector. Chapman and Hall.
3. Brook, R.J. (Ed.) (1991). Concise encyclopedia of advanced ceramic materials. Pergamon Press.
4. Cheremisinoff, N.P. (Ed.) (1990). Handbook of ceramics and composites, 3 Vols. Marcel Dekker.
5. Clark, S.P. (Ed.) (1996). Handbook of physical constants, memoir 97. Geological Society of America.
6. Schwartz, M.M. (1992). Handbook of structural ceramics. McGraw-Hill. *A great deal of data and information on processing and applications.*
7. Kaye, G.W.C., & Laby, T.H. (1986). Tables of physical & chemical constants (15th ed.). Longman.
8. Kingery, W.D., Bowen, H.K., & Uhlmann, D.R. (1976). Introduction to ceramics (2nd ed.). Wiley.
9. Materials Engineering (1992). Materials selector. Penton Press.
10. Morrell, R. (1985). Handbook of properties of technical & engineering ceramics Parts I and II. National Physical Laboratory.
11. Musikant, S. (1991). What every engineer should know about ceramics. Marcel Dekker. Good on data.
12. Richerson, D.W. (1992). Modern ceramic engineering (2nd ed.). Marcel Dekker.
13. Brandes, E.A., & Brook, G.B. (Eds.) (1992). Smithells metals reference book (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
14. Harper, C.A. (2001). Handbook of ceramics, glasses and diamonds. McGraw-Hill. *A comprehensive compilation of data and design guidelines.*
15. Richerson, D.W. (2000). The magic of ceramics. American Ceramics Society. *A readable introduction to ceramics, both old and new.*

Glasses

1. ASM engineered materials handbook, Vol. 4, Ceramics and glasses (1991). ASM International.
2. Boyd D.C., & Thompson D.A. (1980). Glass. Reprinted from Kirk-Othmer: Encyclopedia of chemical technology, Vol. 11 (3rd ed.), pp 807–880. Wiley.

3. Oliver, D.S. (1975). *Engineering design guide 05: The use of glass in engineering*. Oxford University Press.
4. Bansal, N.P., & Doremus, R.H. (1966). *Handbook of glass properties*. Academic Press.

Cement and concrete

1. Cowan, H.J., & Smith, P.R. (1988). *The science and technology of building materials*. Van Nostrand-Reinhold.
2. Illston, J.M., Dinwoodie, J.M., & Smith, A.A. (1979). *Concrete, timber and metals*. Van Nostrand-Reinhold.
3. Neville, A.M. (1996). *Properties of concrete* (4th ed.). Longman Scientific and Technical.

An excellent introduction to the subject.

12.2.7 Composites: PMCs, MMCs, and CMCs

The fabrication of composites allows so many variants that no hard-copy data source can capture them all; instead, they list properties of matrix and reinforcement and of certain generic lay-ups or types. The *Engineers Guide* and the *Composite Materials Handbook*, listed first, are particularly recommended.

Composites, general

1. Weeton, J.W., Peters, D.M., & Thomas, K.L. (Eds.) (1987). *Engineers guide to composite materials*. ASM International.
The best starting point: data for all classes of composites.
2. Schwartz, M.M. (Ed.) (1992). *Composite materials handbook* (2nd ed.). McGraw-Hill.
Lots of data on PMCs, less on MMCs and CMCs, processing, fabrication, applications, and design information.
3. *ASM engineered materials handbook, Vol 1: Composites* (1987). ASM International.
4. Seymour, R.B. (1991). *Reinforced plastics, properties and applications*. ASM International.
5. Cheremisinoff, N.P. (Ed.) (1990). *Handbook of ceramics and composites, Vols. 1–3*. Marcel Dekker.
6. Kelly, A. (Ed.) (1989). *Concise encyclopedia of composited materials*. Pergamon Press.
7. Middleton, D.H. (1990). *Composite materials in aircraft structures*. Longman Scientific and Technical Publications.
8. Smith, C.S. (1990). *Design of marine structures in composite materials*. Elsevier Applied Science.

Metal matrix composites

1. *ASM engineered materials handbook, Vol. 1: Composites* (1987). ASM International.
2. *Technical data sheets* (1995). Duralcan USA.

3. Technical data sheets (1995). 3M Company.

12.2.8 Foams and cellular solids

Many of the references given in Section D2.5 for polymers and elastomers mention foam. The references given here contain much graphical data and simple formulae that allow properties of foam to be estimated from the foam's density and the properties of the solid of which it is made, but in the end, it is necessary to contact suppliers. See also Section D.4, Databases and Expert Systems as Software; some are good on foams. For woods and wood-based composites, see Section D2.10.

1. Cellular polymers (1981–1996). RAPRA Technology.
2. Encyclopedia of chemical technology, Vol. 2 (3rd ed.), pp. 82–126 (1980). Wiley.
3. Encyclopedia of polymer science and engineering, Vol. 3 (2nd ed.), section C (1985). Wiley.
4. Gibson, L.J., & Ashby, M.F. (1997). Cellular solids. Cambridge University Press.
5. Basic text on foamed polymers, metals, ceramics, and glasses, as well as and natural cellular solids.
6. Handbook of industrial materials (2nd ed.), pp. 537–556 (1992). Elsevier Advanced Technology.
7. Hilyard, N.C., & Cunningham, A. (Eds.) (1994). Low density cellular plastics — physical basis of behaviour. Chapman and Hall.
Specialized articles on aspects of polymer-foam production, properties, and uses.
8. Plascams, Version 6 (1995). Plastics computer-aided materials selector. RAPRA Technology Limited.
9. Saechtling, H. (Ed.) (1983). Saechtling: International plastics handbook. MacMillan.
10. Seymour, R.P. (1987). Polymers for engineering applications. ASM International.

12.2.9 Stone, rocks, and minerals

There is an enormous literature on rocks and minerals. Start with the handbooks listed below; then ask a geologist for guidance.

1. Atkinson B.K. (1987). The fracture mechanics of rock. Academic Press.
2. Clark, S.P., Jr. (Ed.) (1966). Handbook of physical constants. Memoir 97, The Geological Society of America.
Old but trusted compilation of property data for rocks and minerals.
3. Lama, R.E., & Vutukuri, V.S. (Eds.) (1978). Handbook on mechanical properties of rocks, Vols. 1–4. Trans Tech Publications.
4. Griggs, D., & Handin, J. (Eds.) (1960). Rock deformation. Memoir 79, The Geological Society of America.
5. Sorace, S. (1966). Long-term tensile and bending strength of natural building stones. Materials and Structures, 29, 426–435.

12.2.10 Timber woods and wood-based composites

Woods, like composites, are anisotropic; useful sources list properties along and perpendicular to the grain. The U.S. Forest Products Laboratory's Wood Handbook and Kollmann and Côté's Principles of Wood Science and Technology are particularly recommended.

Woods and timbers, general

1. Bodig, J., & Jayne, B.A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold.
2. Dinwoodie, J.M. (1989). *Wood, nature's cellular polymeric fiber composite*. The Institute of Metals.
3. Dinwoodie, J.M. (1981). *Timber, its nature and behaviour*. Van Nostrand-Reinhold. *Basic text on wood structure and properties. Not much data.*
4. Gibson, L.J., & Ashby, M.F. (1997). *Cellular solids* (2nd ed.). Cambridge University Press.
5. Jane, F.W. (1970). *The structure of wood* (2nd ed.). A. and C. Black.
6. Kollmann, F.F.P., & Côté, W.A., Jr. (1968). *Principles of wood science and technology*, Vol. 1, Solid wood. Springer-Verlag. The bible.
7. Kollmann, F., Kuenzi, E., & Stamm, A. (1968). *Principles of wood science and technology*, Vol. 2, Wood-based materials. Springer-Verlag.
8. Schniewind, A.P. (Ed.) (1989). *Concise encyclopedia of wood and wood-based materials*. Pergamon Press.

Timber: Data compilations

1. BRE (1996). *BRE information papers*. Building Research Establishment (BRE).
2. Forest Products Laboratory (1989). *Handbook of wood and wood-based materials*. Forest Service, U.S. Department of Agriculture. Hemisphere Publishing Corporation.
A massive compilation of data for North American woods.
3. Informationsdienst Holz (1996). *Merkblattreihe Holzarten*.
4. TRADA (1978/1979). *Timbers of the world*, Vols. 1– 9. Timber Research and Development Association.
5. TRADA (1991). *Information sheets*. Timber Research and Development Association.

Timber and wood-composite standards

1. Great Britain. British Standards Institution (BSI), www.bsigroup.com
2. Germany. Deutsches Institut für Normung (DIN), www.din.de
3. United States. American Society for Testing and Materials (ASTM), www.astm.org

Software and Internet data sources

1. CES woods database, www.grantadesign.com
2. PROSPECT, Oxford Forestry Institute, Department of Plant Sciences, Oxford University www.plants.ox.ac.uk/ofi/prospect/index
A database of the properties of tropical woods of interest to a wood user; includes information about uses, workability, treatments, and origins.
3. Woods of the world (1994). *Tree Talk*.
A CD-ROM of woods, with illustrations of structure, information about uses, origins, habitat, and so on.
4. WoodWeb, www.woodweb.com

Woodwork industry web service. Contains information about woodworking-related companies

12.2.11 Natural fibers and other natural materials Natural materials, general

1. Alexander, R.M. (1983). *Animal mechanics* (2nd ed.). Blackwell Scientific.
2. Brown, C.H. (1975). *Structural materials in animals*. Pitman.
3. Currey, J.D., Wainwright, S.A., & Biggs, W.D. (1982). *Mechanical design in organisms*. Princeton University Press.
4. Fung, Y.C. (1993). *Biomechanics: Mechanical properties of living tissues* (2nd ed.). Springer-Verlag.
5. Gibson, L.J., & Ashby, M.F. (1997). *Cellular solids: structure and properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.
6. McMahon, T.A. (1984). *Muscles, reflexes, and locomotion*. Princeton University Press.
7. Silver, F.H. (1987). *Biological materials: Structure, mechanical properties, and modeling of soft tissues*. New York University Press.
8. Vincent, J.F.V., & Currey, J.D. (1980). *The mechanical properties of biological materials*. Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology (no.34). Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.
9. Vogel, S., & Calvert, R.A. (illustrator) (1988). *Life's devices: The physical world of animals and plants*. Princeton University Press.
10. Yamada, H. (1970). *Strength of biological materials*. Williams & Wilkins.

Wood and wood-like materials (wood cell wall, wood, cork, bamboo, palm, rattan)

1. Amada, S., Munekata, T., Nagase, Y., Ichikawa, Y., Kirigai, A., & Yang, Z.F. (1996). The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradient and composite materials, *J. Compos. Mater.*, 30(7), 800–819.
2. Bhat, K., & Mathew, A. (1995). Structural basis of rattan biomechanics. *Biomimetics*, 3(2), 67–80.
3. Frühwald, A., Peek, R.-D., & Schulte, M. (1992). Nutzung von kokospalmenholz am beispiel von nordsulawesi, Indonesien, technical report. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*, 171. Kommissionsverlag Max Wiederbusch.
4. Gibson, L.J., Easterling, K.E., & Ashby, M.F. (1981). The structure and mechanics of cork. *P. Roy. Soc. Lond. A*, 377(1769), 99–117.
5. Godbole, V.S., & Lakkad, S.C. (1986). Effect of water-absorption on the mechanical properties of bamboo. *J. Mater. Sci. Lett.*, 5(3), 303–304.
6. Janssen, J.J.A. (1991). *Mechanical properties of bamboo* *Forestry Sciences*, Vol. 37, Kluwer Academic Publishers.
7. Killmann, W. (1983). Some physical-properties of the coconut palm stem. *Wood Sci. Tech.*, 17(3), 167–185.
8. Killmann, W. (1993). *Struktur, eigenschaften and nutzung von stämmen wirtschaftlich wichtiger palmen*. PhD thesis, Universität Hamburg.

9. Kloot, N. (1952). Mechanical and physical properties of coconut palm. *Austr. J. Appl. Sci.*, 3(4), 293–322.
10. Lakkad, S.C., & Patel, J.M. (1981). Mechanical properties of bamboo, a natural composite. *Fibre Sci. Tech.*, 14(4), 319–322.
11. Mark, R.E. (1967). *Cell wall mechanics of tracheids*. Yale University Press.
12. Rich, P.M. (1987). Mechanical structure of the stem of arborescent palms. *Bot. Gazette*, 148(1), 42–50.
13. Rosa, M.E., & Fortes, M.A. (1988a). Stress-relaxation and creep of cork. *J. Mater. Sci.*, 23(1), 35–42.
14. Rosa, M.E., & Fortes, M.A. (1988b). Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. *J. Mater. Sci.*, 23(3), 879–885.
15. Rosa, M.E., & Fortes, M.A. (1991). Deformation and fracture of cork in tension. *J. Mater. Sci.*, 26(2), 341–348.

Plant tissue (apple and potato parenchyma, fruit skins, seaweed, nuts)

1. Blahovec, J. (1988). Mechanical properties of some plant materials. *J. Mater. Sci.*, 23(10), 3588–3593.
2. Gibson, L.J., & Ashby, M.F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.
3. Greenberg, A.R., Mehling, A., Lee, M., & Bock, J.H. (1989). Tensile behavior of grass. *J. Mater. Sci.*, 24(7), 2549–2554.
4. Jennings, J.S., & Macmillan, N.H. (1986). A tough nut to crack. *J. Mater. Sci.*, 21(5), 1517–1524.
5. Venkataswamy, M.A., Pillai, C.K.S., Prasad, V.S., & Satyanarayana, K.G. (1987). Effect of weathering on the mechanical properties of midribs of coconut leaves. *J. Mater. Sci.*, 22(9), 3167–3172.
6. Vincent, J.F.V. (1989). Relationship between density and stiffness of apple flesh. *J. Sci. Food. Agr.*, 47(4), 443–462.
7. Vincent, J.F.V. (1990). Fracture properties of plants. *Adv. Bot. Res.*, 17, 235–287.
8. Wang, C.H., Zhang, L.C., & Mai, Y.W. (1994). Deformation and fracture of macadamia nuts. 1. Deformation analysis of nut-in-shell. *Int. J. Fracture*, 69(1), 51–65.
9. Wang, C.H., & Mai, Y.W. (1994). Deformation and fracture of macadamia nuts. 2. Microstructure and fracture mechanics analysis of nutshell. *Int. J. Fracture*, 69(1), 67–85.

Cellulose, cotton, flax, hemp, jute, ramie

1. Currey, J.D., Wainwright, S.A., & Biggs, W.D. (1982). *Mechanical design in organisms*. Princeton University Press.
2. Gibson, L.J., & Ashby, M.F. (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.
3. Vincent, J.F.V. (1990). *Structural biomaterials* (revised edition). Princeton University Press.

4. Wainwright, S.A, Gosline, J.M., & Biggs, W.D. (1992). Mechanical design in organisms. Princeton University Press
5. Wainwright, S.A. (1980). Adaptive materials: a view from the organism. In J.F.V. Vincent, & J.D. Currey (Eds.), The mechanical properties of biological materials. Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology, 34, 483–453. Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.

Silk

1. Calvert, P. (1989). Natural polymers—spinning ties that bind. *Nature*, 340, 266.
2. Denny, M. (1980). Silks—their properties and functions. In J.F.V. Vincent & J.D. Currey (Eds.), The mechanical properties of biological materials. Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology, 34, 247–272. Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.
3. Gosline, J.M., Demont, M.E., & Denny, M.W. (1986). The structure and properties of spider silk. *Endeavour*, 10 (1), 37–43.

Elastin and resilin

1. Gosline, J.M. (1980). The elastic properties of rubber-like proteins and highly extensible tissues. In J.F.V. Vincent & J.D. Currey (Eds.), The mechanical properties of biological materials. Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology, 34, 331–357. Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.
2. Oxlund, H., Manschot, J., & Viidik, A. (1988). The role of elastin in the mechanical properties of skin. *J. Biomech.*, 21(3), 213–218.

Collagen, ligament, tendon

1. Andersen, K.L., Pedersen, E.H., & Melsen, B. (1991). Material parameters and stress profiles within the periodontal ligament. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, 99(5), 427–440.
2. Bennett, M.B., Ker, R.F., Dimery, N.J., & Alexander, R.M. (1986). Mechanical properties of various mammalian tendons. *J. Zool.*, 209(4), 537–548.
3. Bosch, U., Decker, B., Kasperczyk, W., Nerlich, A., Oestern, H.J., & Tscherne, H. (1992). The relationship of mechanical properties to morphology in patellar tendon autografts after posterior cruciate ligament replacement in sheep. *J. Biomech.*, 25(8), 821–830.
4. Butler, D.L., Kay, M.D., & Stouffer, D.C. (1986). Comparison of material properties in fascicle-bone units from human patellar tendon and knee ligaments. *J. Biomech.*, 19(6), 425–432.
5. Grieshaber, F.A., & Faust, U. (1992). Mechanische kenngrößen von biologischem weichgewebe. *Biomed. Technik*, 37(12), 278–286.
6. Kato, Y.P., Christiansen, D.L., Hahn R.A., Shieh, S.J., Goldstein, J.D., & Silver, F.H. (1989). Mechanical properties of collagen fibres: A comparison of reconstituted and rat tendon fibres. *Biomat.*, 10, 38–41.

7. Ker, R.F. (1981). Dynamic tensile properties of the plantaris tendon of sheep (*Ovis aries*). *J. Exp. Biol.*, 93(Aug.), 283–302.
8. Ker, R.F., Alexander, R.M., & Bennett, M.B. (1988). Why are mammalian tendons so thick. *J. Zool.*, 216(2), 309–324.
9. Park, J.B., & Lakes, R.S. (1992). *Biomaterials* (2nd ed.). Plenum Press.
10. Rogers, G.J., Milthorpe, B.K., Muratore, A., & Schindhelm, K. (1990). Measurement of the mechanical properties of the ovine anterior cruciate ligament bone complex—a basis for prosthetic evaluation. *Biomaterials*, 11(2), 89–96.
11. Silver, F.H., Kato, Y.P., Ohno, M., & Wasserman, A.J. (1992). Analysis of mammalian connective tissue—relationship between hierarchical structures and mechanical properties. *J. Long Term Effects Med. Impl.*, 2(2–3), 165–198.
12. Vincent, J.F.V. (1990). *Structural Biomaterials* (revised edition). Princeton University Press.
13. Wainwright, S. (1980). Adaptive materials: A view from the organism. In J.F.V. Vincent & J.D. Currey (Eds.), *The mechanical properties of biological materials. Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology*, 34, 483–453. Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.
14. Wang, X.T., & Ker, R.F. (1995a). Creep-rupture of wallaby tail tendons. *J. Exp. Biol.*, 198(3), 831–845.
15. Wang, X.T., Ker, R.F., & Alexander, R.M. (1995b). Fatigue-rupture of wallaby tail tendons. *J. Exp. Biol.*, 198(3), 847–852.

Muscle

1. Dobrunz, L.E., Pelletier, D.G., & McMahon, T.A. (1990). Muscle-stiffness measured under conditions simulating natural sound production. *Biophys. J.*, 58(2), 557–565.
2. Yamada, H. (1970). *Strength of biological materials*. Williams & Wilkins.

Skin

1. Bauer, A.M., Russell, A.P., & Shadwick, R.E. (1989). Mechanical properties and morphological correlates of fragile skin in gekkonid lizards. *J. Exp. Biol.*, 145, 79–102.
2. Manschot, J.F.M., & Brakkee, A.J.M. (1986a). The measurement and modeling of the mechanical
3. properties of human skin *invivo*. 1. The measurement. *J. Biomech.*, 19(7), 511–515.
4. Manschot, J.F.M., & Brakkee, A.J.M. (1986b). The measurement and modeling of the mechanical properties of human skin *invivo*. 2. The model. *J. Biomech.*, 19(7), 517–521.
5. Oxlund, H., Manschot J., & Viidik, A. (1988). The role of elastin in the mechanical properties of skin. *J. Biomech.*, 21(3), 213–218.
6. Silver, F.H., Kato, Y.P., Ohno, M., & Wasserman, A.J. (1992). Analysis of mammalian connective tissue—relationship between hierarchical structures and mechanical properties. *J. Long Term Effects Med. Impl.*, 2(2–3), 165–198.

7. Swartz, S.M., Groves, M.S., Kim, H.D., & Walsh, W.R. (1996). Mechanical properties of bat wing membrane skin. *J. Zool.*, 239(2), 357–378.

Leather

1. Attenburrow, G.E., & Wright, D.M. (1994). Studies of the mechanical behavior of partially processed leather. *J. Am. Leather Chem. Assoc.*, 89(12), 391–402.
2. Kronick, P., & Maleef, B. (1992). Nondestructive failure testing of bovine leather by acoustic emission. *J. Am. Leather Chem. Assoc.*, 87(7), 259–265.
3. Lin, J., & Hayhurst, D.R. (1993a). The development of a bi-axial tension test facility and its use to establish constitutive equations for leather. *Eur. J. Mech. A—Solids*, 12(4), 493–507.
4. Lin, J., & Hayhurst, D.R. (1993b). Constitutive equations for multiaxial straining of leather under uniaxial stress. *Eur. J. Mech. A—Solids*, 12(4), 471–492.

Cartilage

1. Rains, J.K., Bert, J.L., Roberts, C.R., & Pare, P.D. (1992). Mechanical properties of human tracheal cartilage. *J. Appl. Physiol.*, 72(1), 219–225.
2. Silver, F.H., Kato, Y.P., Ohno, M., & Wasserman, A.J. (1992). Analysis of mammalian connective tissue—relationship between hierarchical structures and mechanical properties. *J. Long Term Effects Med. Impl.*, 2(2-3), 165–198.
3. Swanson, S. (1980). The elastic properties of rubber-like protein and highly extensible tissue. In J.F.V. Vincent & J.D. Currey (Eds.), *The mechanical properties of biological materials. Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology*, 34, 377–395. Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.

Bone (including antler)

1. Ashman, R.B., Corin, J.D., & Turner, C.H. (1987). Elastic properties of cancellous bone—measurement by an ultrasonic technique. *J. Biomech.*, 20(10), 979–986.
2. Ashman, R.B., & Rho, J.Y. (1988). Elastic modulus of trabecular bone material. *J. Biomech.*, 21(3), 177–181.
3. Currey, J.D. (1984). *The mechanical adaptations of bones*. Princeton University Press.
4. Currey, J.D. (1988). The effects of drying and re-wetting on some mechanical properties of cortical bone. *J. Biomech.*, 21(5), 439–441.
5. Currey, J.D. (1990). Physical characteristics affecting the tensile failure properties of compact bone. *J. Biomech.*, 23(8), 837–844.
6. Dickenson, R.P., Hutton, W.C., & Stott, J.R.R. (1981). The mechanical properties of bone in osteoporosis. *J. Bone Joint Surg.—Brit. Vol.*, 63(2), 233–238.
7. Gibson, L.J. (1985). The mechanical behavior of cancellous bone. *J. Biomech.*, 18(5), 317 et seq.
8. Goldstein, S.A. (1987). The mechanical properties of trabecular bone—dependence on anatomic location and function. *J. Biomech.*, 20(11–12), 1055–1061.

9. Swanson, S. (1980). The elastic properties of rubber-like protein and highly extensible tissue. In J.F.V. Vincent & J.D. Currey (Eds.), *The mechanical properties of biological materials. Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology*, 34, 377–395. Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.
10. Kitchener, A. (1991). The evolution and mechanical design of horns and antlers. In J. Rayner & R. Wootton (Eds.), *Society for experimental biology seminar series: no. 36. Biomechanics in evolution* (pp. 229–253). Cambridge University Press.
11. Linde, F., & Hvid, I. (1987). Stiffness behavior of trabecular bone specimens. *J. Biomech.*, 20(1), 83–89.
12. Lotz, J.C., Gerhart, T.N., & Hayes, W.C. (1991). Mechanical properties of metaphyseal bone in the proximal femur. *J. Biomech.*, 24(5), 317–329.
13. Moyle, D.D., & Gavens, A.J. (1986). Fracture properties of bovine tibial bone. *J. Biomech.*, 19 (11), 919–927.
14. Moyle, D.D., & Walker, M.W. (1986). The effects of a calcium deficient diet on the mechanical properties and morphology of goose bone. *J. Biomech.*, 19(8), 613–625.
15. Sharp, D.J., Tanner, K.E., & Bonfield, W. (1990). Measurement of the density of trabecular bone. *J. Biomech.*, 23(8), 853–857.
16. Sun, J.J., & Geng, J. (1987). A study of Haversian systems. *J. Biomech.*, 20(8), 815.
17. Watkins, M. (1987). The development of a tough artificial composite based on antler bone. PhD thesis, University of Reading.

Dentine, enamel

Brear, K., Currey, J.D., Pond, C.M., & Ramsay, M.A. (1990). The mechanical properties of the dentin and cement of the tusk of the narwhal *Monodon monoceros* compared with those of other mineralized tissues. *Arch. Oral Biol.*, 35(8), 615–621.

Coral

1. Chamberlain, J. (1978). Mechanical properties of coral skeleton: compressive strength and its adaptive significance. *Paleobiol.*, 4, 419–435.
2. Kim, K., Goldberg, W.M., & Taylor, G.T. (1992). Architectural and mechanical properties of the black coral skeleton (Coelenterata, Antipatharia)—a comparison of 2 species. *Biol. Bull.*, 182(2), 195–209.
3. Scott, P.J.B., & Risk, M.J. (1988). The effect of *Lithophaga* (Bivalvia, Mytilidae) boreholes on the strength of the coral *Porites lobata*. *Coral Reefs*, 7(3), 145–151.
4. Vosburgh, F. (1982). *Acropora reticulata*—structure, mechanics and ecology of a reef coral. *P. Roy. Soc. Lond. B*, 214(1197), 481–499.

Alpha-keratins

1. Bertram, J.E.A., & Gosline, J.M. (1986). Fracture toughness design in horse hoof keratin. *J. Exp. Biol.*, 125, 29–47.
2. Bertram, J.E.A., & Gosline, J.M. (1987). Functional design of horse hoof keratin—the modulation of mechanical properties through hydration effects. *J. Exp. Biol.*, 130, 121–136.

3. Fraser, R., & Macrae, T. (1980). Molecular structure and mechanical properties of keratins. In J.F.V. Vincent & J.D. Currey (Eds.), *The mechanical properties of biological materials. Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology*, 34, 211–246. Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.
4. Kitchener, A. (1991). The evolution and mechanical design of horns and antlers. In J. Rayner & R. Wootton (Eds.), *Society for experimental biology seminar series: no.36. Biomechanics in evolution* (pp. 229–253). Cambridge University Press.

Insect cuticle

1. Alexander, D.E., Blodig, J., & Hsieh, S.Y. (1995). Relationship between function and mechanical properties of the pleopods of isopod crustaceans. *Invertebrate Biol.*, 114(2), 169–179.
2. Gunderson, S., & Whitney, J. (1992). Insect cuticle microstructure and its application to advanced composites. *Biomimetics*, 1(2), 177–197.
3. Vincent, J. (1980). Insect cuticle: A paradigm for natural composites. In J.F.V. Vincent & J.D. Currey (Eds.), *The mechanical properties of biological materials. Proceedings of the Symposia of the Society for Experimental Biology*, 34, 183–210. Cambridge University Press for the Society for Experimental Biology.

Mollusk shell

1. Jackson, A.P., Vincent, J.F.V., & Turner, R.M. (1988). The mechanical design of nacre. *P. Roy. Soc. Lond. B*, 234(1277), 415 et seq.
2. Jackson, A.P., Vincent, J.F.V., & Turner, R.M. (1990). Comparison of nacre with other ceramic composites. *J. Mater. Sci.*, 25(7), 3173–3178.

12.2.12 Measures of environmental impact

1. AggreGain (2007). The Waste and Resources Action Program (WRAP). www.wrap.org.uk
Data and an Excel-based tool to calculate energy and carbon footprint of recycled road-bed materials.
2. AMC (2006). Australian Magnesium Corporation, www.aph.gov.au/house/committee/enviro/greenhse/gasrpt/Sub65-dk.pdf
3. APME (1997, 1998, 1999, 2000). Eco-profiles of the European plastics industry. Association of *Plastics Manufacturers in Europe*. www.plasticseurope.org
4. Ashby, M.F. (2009). *Materials and the environment*. Butterworth-Heinemann.
5. BCA (2007). *A carbon strategy for the cement industry*. British Cement Association, www.cementindustry.co.uk
6. Boustead Model 5 (2007). Boustead Consulting. www.boustead-consulting.co.uk
An established life-cycle assessment tool.
7. Boustead, I. (1999–2006). APME Association of Plastics Manufacturers in Europe, Report series.
8. British Metals Recycling Association, www.britmetrec.org.uk

9. Building Research Establishment (2006). BRE Environmental Profiles database. BRE Environment Division.
10. BUWAL (1996). Bundesamt für umwelt, wald und landwirtschaft, Environmental series No. 250, Life Cycle Inventories for Packaging, Vols. I and II.
11. Chapman, P.F., & Roberts, F. (1993). Metals resources and energy. Butterworths.
12. Chemlink Australasia (1997). www.chemlink.com.au/mag&oxide.htm
13. ELCD (2008). <http://lca.jrc.ec.europa.eu>
A high-quality Life Cycle Inventory (LCI) core data sets of this first version of the Commission's European Reference Life Cycle Data System (ELCD).
14. Energy Information Association (2008). www.eia.doe.gov
Official energy statistics from the U.S. Government.
15. European Aluminium Association (2000). www.eaa.net
16. Green Design Initiative, www.ce.cmu.edu/GreenDesign
17. GREET (2007). Argonne National Laboratory and the U.S. Department of Transport, www.transportation.anl.gov
Software for analyzing vehicle energy use and emissions.
18. Hammond, G., & Jones, C. (2006). Inventory of carbon and energy (ICE). Department of Mechanical Engineering, University of Bath.
19. IDEMAT, Environmental Materials Database, www.idemat.nl
20. International Aluminum Institute (2000). Life cycle inventory of the worldwide aluminum industry Part 1—automotive, www.world-aluminum.org
21. Kemna, R., van Elburg, M., Li, W., & van Holsteijn, R. (2005). Methodology study of eco-design of energy-using products. Van Holsteijn en Kemna BV (VHK).
22. Kennedy, J. (1997). Energy minimisation in road construction and maintenance. *Best Practice Report for the U.K. Department of the Environment.*
23. Lafarge Cement, Lafarge Cement UK, www.lafarge.com
24. Lawson, B. (1996). Building materials, energy and the environment: Towards ecologically sustainable development. RAlA, Canberra, www.climatechange.gov.au
25. Lime Technology (2007). www.limetechnology.co.uk
26. MEEUP Methodology Report, final (2005). VHK. www.pre.nl
A report by the Dutch consultancy VHK commissioned by the European Union, detailing its implementation of an LCA tool designed to meet the EU Energy-Using Products directive.
27. Pentron, www.pentron.com
28. Pilz, H., Schweighofer, J., & Kletzer, E. (2005). The contribution of plastic products to resource efficiency. Gesellschaft für umfassende analysen (GUA), Vienna.
29. Schlesinger, M.E. (2007). Aluminum recycling. CRC Press.
30. Stiller, H. (1999). Material intensity of advanced composite materials. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
31. Sustainable concrete (2008). www.sustainableconcrete.org.uk/
A website representing U.K. concrete producers carrying useful information about carbon footprint.

32. Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R. (1988). Energy analysis of thermal chemical and metallurgical processes. Hemisphere.
33. Szokolay, S.V. (1980). Environmental science handbook: For architects and builders. Construction Press.
34. The Nickel Institute North America (2007). www.nickelinstitute.org.
35. Waste Online (2008). www.wasteonline.org.uk/resources/InformationSheets/Plastics.htm

12.3 INFORMATION FOR MANUFACTURING PROCESSES

1. Alexander, J.M., Brewer, R.C., & Rowe, G.W. (1987). Manufacturing technology, Vol. 2: Engineering processes. Ellis Norwood.
2. Bralla, J.G. (1986). Handbook of product design for manufacturing. McGraw-Hill.
3. Budinski, K.G., & Budinski, M.K. (2010). Engineering materials, properties and selection (9th ed.). Prentice Hall.
A well-established materials text that deals well with both material properties and processes.
4. Waterman, N.A., & Ashby, M.F. (Eds.) (1996). Materials selector. Chapman and Hall.
5. Dieter, G.E. (1999). Engineering design, a materials and processing approach (3rd ed.). McGraw-Hill.
A well-balanced and respected text focusing on the place of materials and processing in technical design.
6. Kalpakjian, S. (1984). Manufacturing processes for engineering materials. Addison Wesley.
7. Lascoe, O.D. (1989). Handbook of fabrication processes. ASM International.
8. Schey, J.A. (1977). Introduction to manufacturing processes. McGraw-Hill.
9. Suh, N.P. (1990). The principles of design. Oxford University Press.

Software

1. CES: Cambridge Engineering Selector (2010). www.grantadesign.com.
2. Comprehensive selection system for all classes of materials and manufacturing processes. Variety of optional reference data sources, connects directly to www.matdata.net. Windows and web format.
3. Modest price.

Internet sources

1. Cast Metals Federation, www.castmetalsfederation.com
2. Castings Technologies International, www.castingstechnology.com
3. Confederation of British Metalforming, www.britishmetalforming.com
4. National Center for Excellence in Metalworking Technology, www.ncemt.ctc.com
5. PERA, www.pera.com
6. The British Manufacturing Plant Constructors' Association, www.bmpca.org.uk
7. TWI (The Welding Institute), www.twi.co.uk

12.4 DATABASES AND EXPERT SYSTEMS AS SOFTWARE

1. Active Library on Corrosion. ASM International.
PC format requiring CD-ROM drive. Graphical, numerical, and textual information on corrosion of metals. Modest price.
2. ASM Handbooks Online. ASM International, www.asminternational.org
3. Alloycenter. ASM International, www.asminternational.org
4. ALUSELECT P1.0 (1992). Engineering property data for wrought aluminum alloys. European Aluminum Association.
PC format, DOS environment. Mechanical, thermal, electrical, and environmental properties of wrought aluminum alloys. Inexpensive.
5. CAMPUS: Computer Aided Material Preselection by Uniform Standards (1995), www.campusplastics.com
Polymer data from approximately 30 suppliers, measured to set standards.
6. CETIM-EQUIST II: Centre Technique des Industries Mécaniques (1997). Senlis: CETIM.
PC format, DOS environment. Compositions and designations of steels.
7. CETIM-Matériaux: Centre Technique des Industries Mécaniques (1997). Senlis: CETIM.
Online system. Compositions and mechanical properties of materials.
8. CETIM-SICLOP: Centre Technique des Industries Mécaniques (1997). Senlis: CETIM.
Online system. Mechanical properties of steels.
9. Cambridge Engineering Selector (2010), www.grantadesign.com
Comprehensive selection system for all classes of materials and manufacturing processes. Variety of optional reference data sources; connects directly to www.matdata.net. Windows and web format. Modest price.
10. CUTDATA: Machining Data System. Cincinnati: Metcut Research Associates, Manufacturing Technology Division.
A PC-based system that guides the choice of machining conditions: tool materials, geometries, feed rates, cutting speeds, and so forth. Modest price.
11. EASel: Engineering Adhesives Selector Program (1986). The Design Centre.
A knowledge-based program to select industrial adhesives for joining surfaces.
12. SF-CD (replacing ELBASE): Metal Finishing/Surface Treatment Technology (1992). Metal Finishing Information Services.
Comprehensive information on published data related to surface treatment technology. Regularly updated. Modest price.
13. Material Data Network, www.matdata.net
The Material Data Network provides integrated access to a variety of quality information source, from ASM International, Granta Design, TWI, NPL, UKSteel, Matweb, IDES, etc.
14. PAL II: Permabond Adhesives Locator (1996). Eastleigh: Permabond.

- A knowledge-based PC system for adhesive selection among Permabond adhesives. An impressive example of an expert system that works. Modest price.*
15. PROSPECT: Version 1.1 (1995). Oxford Forestry Institute, Department of Plant Sciences, Oxford University.
A database of the properties of tropical woods of interest to a wood user; includes information about uses, workability, treatments, origins.
 16. OPS (Optimal Polymer Selector), www.grantadesign.com
Integrates Granta Design's generic PolymerUniverse database, with chemical resistance data from RAPRA and grade-specific data for approximately 6000 polymers from CAMPUS, to produce the only comprehensive polymer selection system available.
 17. teCal, Steel Heat-Treatment Calculations. ASM International.
Computes the properties resulting from defined heat treatments of low-alloy steels, using the composition as input. Modest price.
 18. SOFINE PLASTICS (1997). Villeurbanne Cedex: Société CERAP.
Database of polymer properties. Environment and price unknown.
 19. TAPP 2.0, Thermochemical and Physical Properties (1994). ES Microware.
+PC format, CD-ROM, Windows environment. A database of thermochemical and physical properties of solids, liquids, and gases, including phase diagrams neatly packaged with good user manual. Modest price.
 20. UNSearch: Unified Metals and Alloys Composition Search. Materials Park: ASTM.
PC format, DOS environment. A database of information about composition, U.S. designation, and specification of common metals and alloys. Modest price.
 21. Wegst, C.W. (1997). *Stahlschlüssel (Key to Steel)* (17th ed.). Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH.
CD-ROM, PC format. Excellent coverage of European products and manufacturers.
 22. Woods of the World (1994). Tree Talk, Inc.
A CD-ROM of woods, with illustrations of structure, information about uses, origins, habitat, etc.
PC format, requiring CD drive; Windows environment.

12.5 ADDITIONAL USEFUL INTERNET SITES

Metals prices and economic reports

1. American Metal Market, www.amm.com
2. Business Communications Company, www.bccresearch.com
3. Daily Economic Indicators, www.bullion.org.za
4. Iron and Steel Statistics Bureau, www.issb.co.uk
5. Kitco Inc Gold & Precious Metal Prices, www.kitco.com/market
6. London Metal Exchange, www.lme.co.uk
7. Metal Bulletin, www.metalbulletin.plc.uk
8. Metal Powder Report, www.metal-powder.net
9. Metallurgia, www.metallurgia-italiana.net
10. Minerals Information, <http://minerals.usgs.gov/minerals>

11. Roskill Reports www.roskill.com
12. The Precious Metal and Gem Connection, www.thebulliondesk.com

Supplier registers, government organizations, professional societies and trade associations, and standards organizations Supplier registers

1. IndustryLink, www.industrylink.com
2. Kellysearch, www.kellysearch.com
3. Thomas Register, www.thomasregister.com

Government organizations

1. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australia), www.csiro.au
2. National Academies Press, www.nap.edu
3. National Institute of Standards and Technology (U.S.A.), www.nist.gov
4. The Fraunhofer Institute, www.fhg.de

Professional societies and trade associations

1. Aluminium Federation, www.alfed.org.uk
2. ASM International, www.asminternational.org
3. ASME International, www.asme.org
4. British Constructional Steel Work Association, www.steelconstruction.org
5. Cast Metals Federation, www.castmetalsfederation.com
6. Community Trade Union, www.community-tu.org
7. Confederation of British Metalforming, www.britishmetalforming.com
8. Copper Development Association, www.cda.org.uk
9. Institute of Cast Metal Engineers, www.icme.org.uk
10. Institute of Spring Technology, www.ist.org.uk
11. International Aluminium Institute, www.world-aluminum.org
12. International Council on Mining and Metals, www.icmm.com
13. International Titanium Association, www.titanium.org
14. International Zinc Association, www.iza.com
15. Lead Development Association International, www.ldaint.org
16. Materials Information Service, www.iom3.org
17. National Association. of Steel Stock Holders, www.nass.org.uk
18. Nickel Institute, www.nidi.org
19. Pentron, www.pentron.com
20. Society of Automotive Engineers (SAE), www.sae.org
21. Steel Manufacturers Association, www.steelnet.org
22. Steel Construction Institute, www.steel-sci.org
23. The American Ceramics Society, <http://ceramics.org>
24. The British Manufacturing Plant Constructors' Association, www.bmpca.org.uk
25. The Institute of Materials, Minerals and Mining, www.instmat.co.uk
26. The Minerals, Metals & Materials Society, www.tms.org/TMSHome.html
27. UK Steel, www.eef.org.uk/uksteel

28. World Steel Association, www.worldsteel.org

Standards organizations

1. ASTM, www.astm.org
2. BSI, www.bsi.org.uk
3. DIN Deutsches Institut für Normung e.V, www.din.de
4. International Standards Organisation, www.iso.org
5. National Standards Authority of Ireland, www.nsai.ie

Miscellaneous

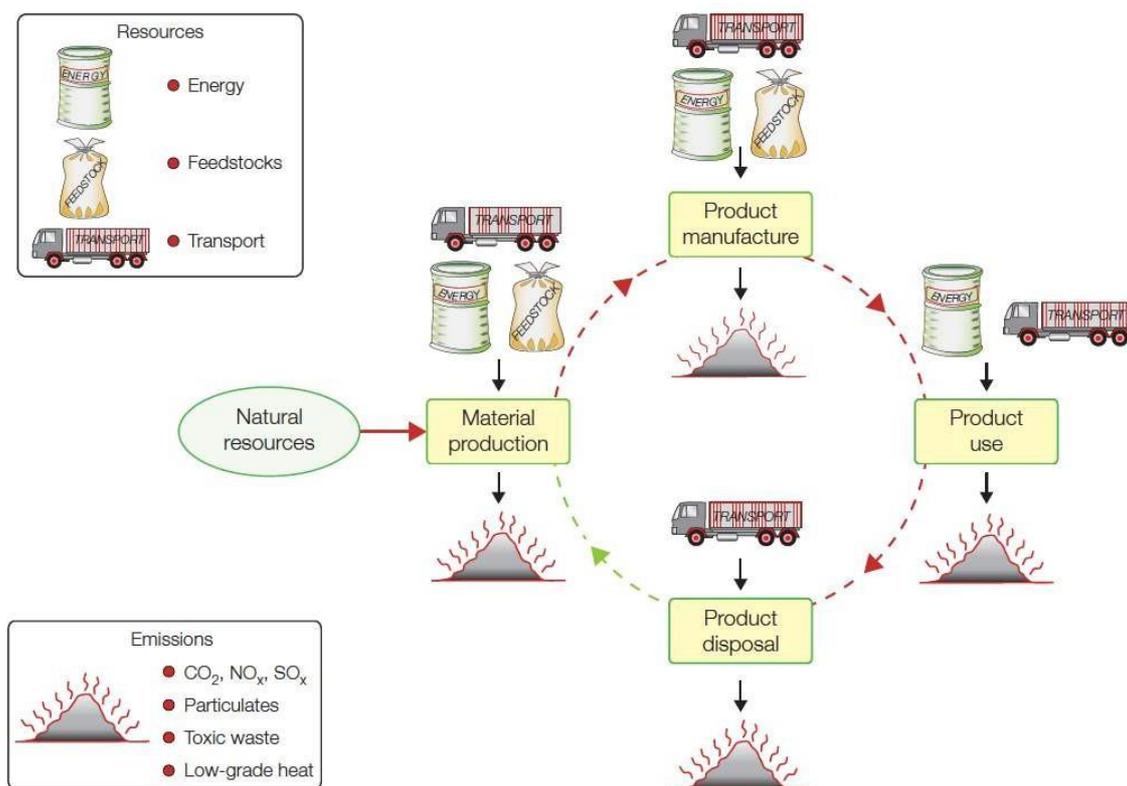
1. Hazardous materials (1), www.phmsa.dot.gov/hazmat
2. Hazardous materials (2), <http://ull.chemistry.uakron.edu/erd>
3. Information for Physical Chemists, www.liv.ac.uk/Chemistry/Links/links.html
4. K&K Associates' thermal connection, www.tak2000.com

MATERIAL DAN LINGKUNGAN

Seluruh aktifitas yang dilakukan oleh manusia akan berdampak pada lingkungan, sedangkan lingkungan memiliki kapasitas dan ambang batas tertentu. Di sisi lain, intensitas manusia dalam menggunakan material dan energy dalam menghasilkan sebuah produk mengalami peningkatan yang sangat tinggi. Tingkat pertumbuhan global sebesar 3% per tahun akan membutuhkan material dalam 25 tahun ke depan. Desain lingkungan adalah upaya menyesuaikan metode desain untuk memperbaiki degradasi lingkungan. Kehidupan rata-rata produk yang diharapkan adalah 10 tahun atau lebih.

13.1 Siklus Hidup Material

Umur siklus material ditunjukkan pada Gambar 13.1. Biji besi dan bahan baku sebagian besar tidak dapat diperbaharui, pada saat proses manufaktur akan menghasilkan produk dan menyisakan sebagian kecil material daur ulang. Energi dan material yang dikonsumsi pada setiap fase dalam siklus akan selalu berkaitan dengan CO₂ dan emisi lainnya, seperti panas, gas, cairan, dan limbah padat.



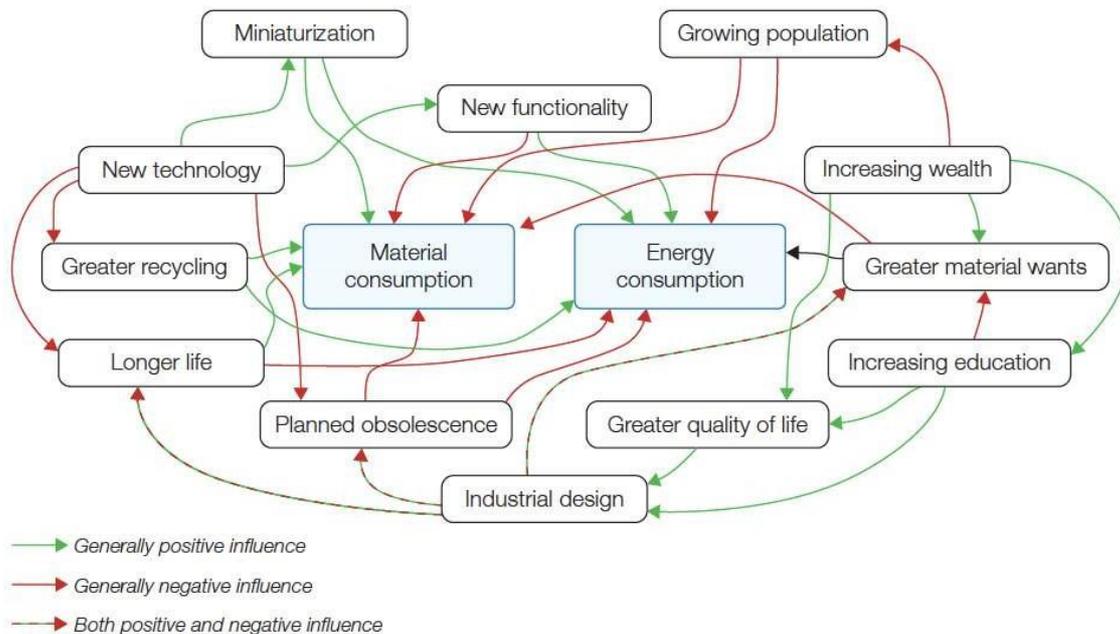
Gambar 13.1 Siklus umur material.

Yang menjadi persoalan adalah jumlah produk sampingan yang tidak diinginkan sering melebihi kapasitas lingkungan untuk dapat menyerapnya. Keberlanjutan membutuhkan solusi,

bahkan perkiraan konservasi diperlukan untuk mengembalikan keseimbangan lingkungan dalam jangka panjang (Gambar 1).

13.2 Material dan Sistem Konsumsi Energi

Cara efektif untuk melestarikan material adalah dengan membuat produk lebih kecil, membuat masa pakai lebih lama, dan mendaur ulang ketika sudah tidak digunakan. Material dan energi merupakan bagian dari sistem yang kompleks dan sangat interaktif, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 13.2. Katalis utama konsumsi seperti *teknologi baru, keusangan yang terencana, meningkatkan kesejahteraan, pendidikan, dan pertumbuhan populasi* akan berpengaruh terhadap aspek penggunaan produk.



Gambar 13.2 Pengaruh konsumsi material dan energi

Garis penghubung menunjukkan pengaruh. Garis hijau menunjukkan pengaruh positif yang diinginkan, sedangkan garis merah menunjukkan pengaruh negatif yang tidak diinginkan. Garis merah-hijau menunjukkan bahwa penggerak memiliki kapasitas untuk pengaruh positif dan negatif.

Pola Penggunaan Produk. Tabel 13.1 menggambarkan pola matriks penggunaan produk. Primary power-consuming yang berada di baris pertama membutuhkan energi untuk melakukan fungsi utamanya. Baris kedua dapat berfungsi tanpa energi tetapi karena alasan kenyamanan, kemudahan, atau keamanan, mengkonsumsi energi untuk menjalankan fungsi sekundernya. Sedangkan pada baris ketiga untuk menjalankan fungsi utamanya tanpa memerlukan energi selain tenaga manusia. Faktor beban melintang ke atas menunjukkan indikator perkiraan intensitas penggunaan.

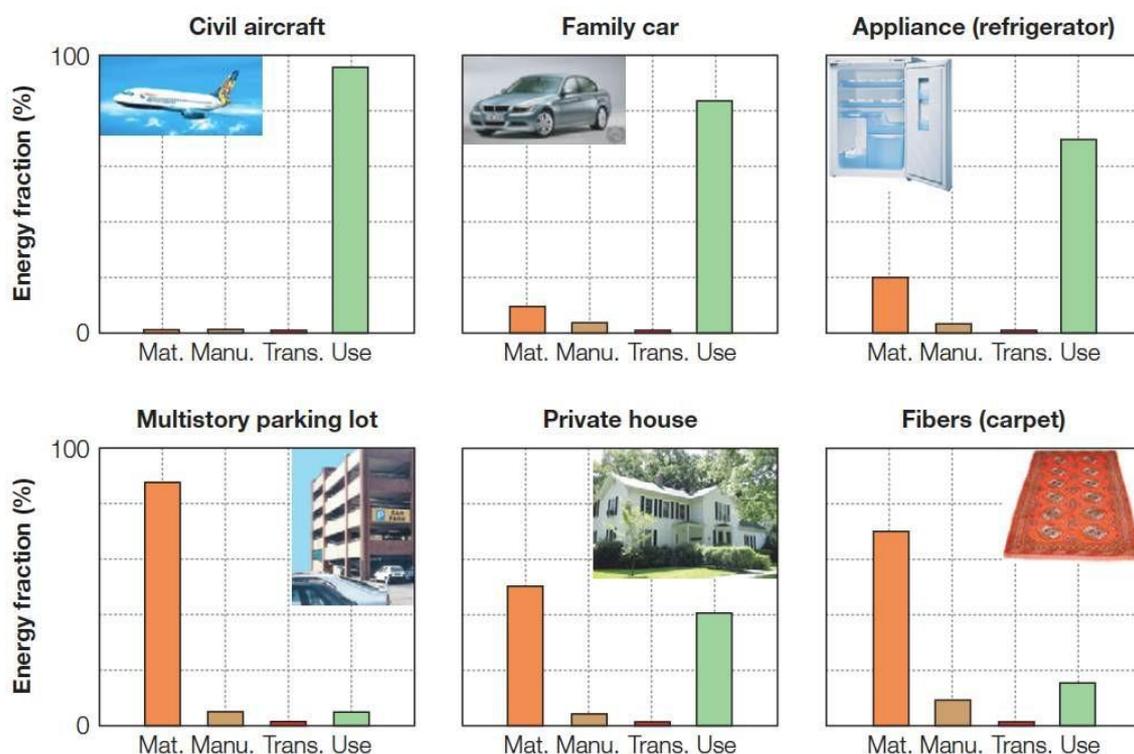
Pemilihan material dan proses mempengaruhi semua fase pada Gambar 13.1. **Produksi**, melalui alur bahan baku dan produk yang tidak diinginkan. **Manufaktur**, melalui tingkat efisiensi dan kebersihan proses pembentukan, penggabungan, dan finishing. **Pemakaian**, melalui kemampuan untuk konversi energi melalui desain yang ringan, efisiensi termal yang

lebih tinggi, dan konsumsi energi yang lebih rendah. **Disposal**, melalui kemampuan digunakan, dibongkar dan didaur ulang kembali yang lebih besar.

Tabel 13.1 Use matrix of product classes

	High load factor	Modest load P factor	Low load factor
Primary power-consuming	Family car Train set Aircraft	Television Freezer	Coffee maker Vacuum cleaner Washing machine
Secondary power-consuming	Housing (heat, light)	Parking lot (light)	Household dishes Clothing (washing)
Nonpower-consuming	Bridges Roads	Furniture Bicycle	Canoe tent

Gambar 13.3 menunjukkan bukti, menggunakan ukuran ini. Ini memiliki dua fitur penting, dengan implikasi penting. **Fitur pertama:** adalah bahwa satu fase hampir selalu mendominasi, menyumbang 80% atau lebih dari energi, kadang-kadang jauh lebih banyak. Jika perubahan besar harus dicapai, fase inilah yang harus menjadi target; pengurangan dengan faktor 2, bahkan dari 10, di sisi lain membuat sedikit perbedaan signifikan terhadap total. **Fitur kedua:** Ketika perbedaan sehebat Gambar 13.3, presisi bukanlah masalah — kesalahan faktor 2 perubahan sangat sedikit. Ini adalah sifat orang-orang yang mengukur hal-hal untuk ingin melakukannya dengan presisi, dan data yang tepat harus menjadi tujuan akhir. Tetapi dimungkinkan untuk bergerak maju tanpa presisi: Penilaian yang tepat dapat diambil dari data yang tidak tepat. Ini adalah pertimbangan penting: Banyak informasi tentang atribut lingkungan tidak tepat.



Gambar 3 Nilai perkiraan konsumsi energy setiap fase produk

MATERIAL DAN DESAIN INDUSTRI

14.1 Piramida Persyaratan

Sebuah produk memiliki biaya pembuatan dan pemasaran. Nilai produk ditentukan oleh 3 hal, yaitu: *“functionality, usability, and give satisfaction”*. ‘Functionality’ ditunjukkan dengan desain teknis yang memainkan peran. Gambar 14.2 digunakan sebagai dasarnya. Produk harus dapat bekerja secara baik, aman dan ekonomis. Functionality sendiri tidak cukup, produk harus mudah dipahami dan dioperasikan. Hal ini disebut sebagai ‘usability’. Persyaratan ketiga adalah produk yang dapat memberikan kepuasan.



Gambar 14.1. Pena, murah dan mahal. Material yang dipilih: akrilik pada bagian atas. Emas, perak, dan enamel pada bagian yang lebih rendah untuk menciptakan estetika dan asosiasi pena.



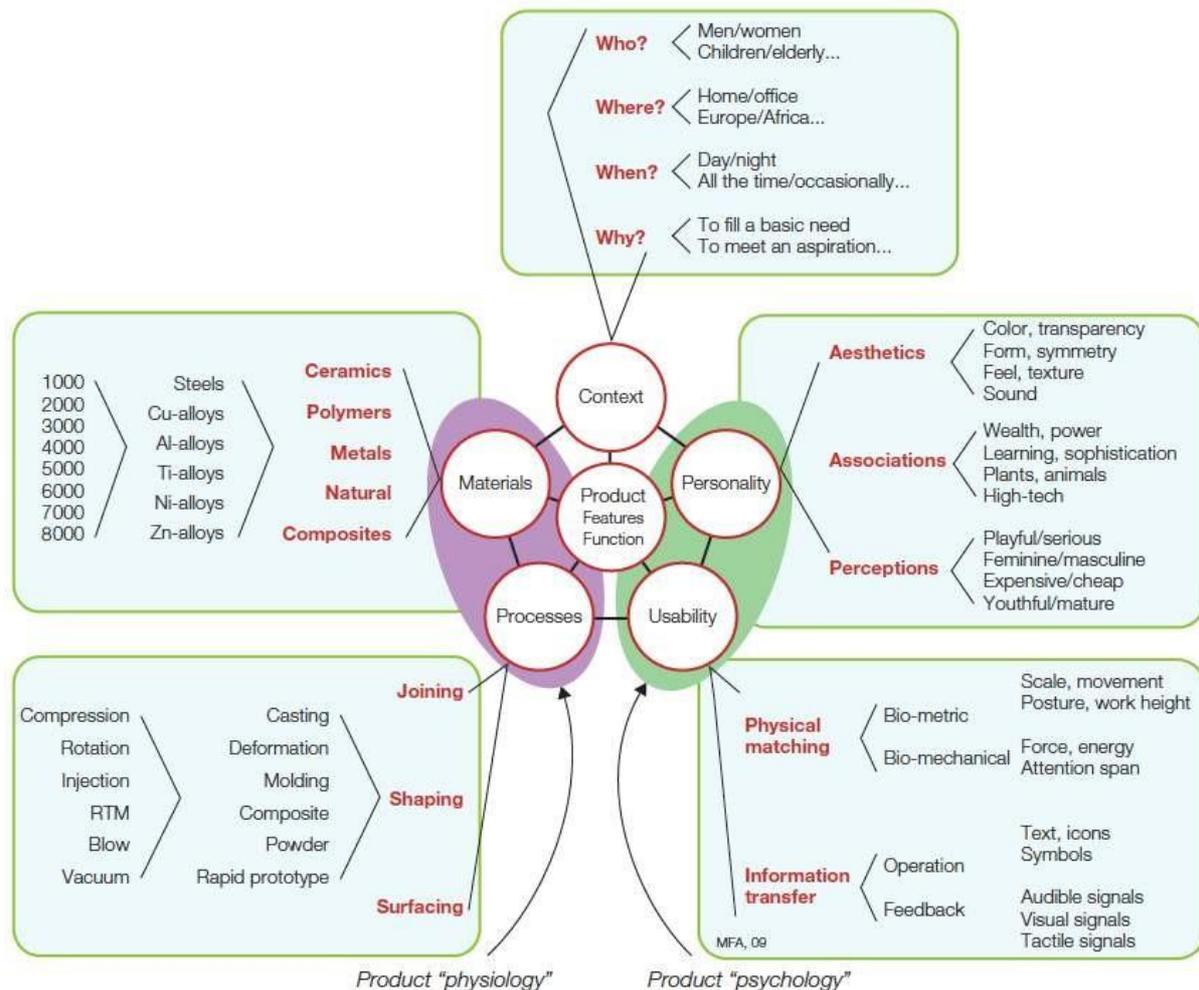
Gambar 14.2. Persyaratan piramida. Bagian bawah piramida disebut "desain teknis," bagian atas "desain industri." Ketiga tingkatan membentuk satu proses yang disebut "desain produk."

Nilai produk adalah tingkat keterpenuhan harapan konsumen terhadap fungsionalitas, kegunaan, dan kepuasan. Karakter yang mengagumkan adalah karakter yang berfungsi dengan baik, berinteraksi secara efektif, dan bermanfaat bagi perusahaan. Pena pada Gambar 14.1 berfungsi dengan baik dan mudah digunakan. Perbedaan besar harga menyiratkan bahwa dua pena yang di bawah memberikan tingkat kepuasan yang tidak ditawarkan oleh dua pena di sebelah atas. Perbedaan yang paling jelas adalah material yang digunakan.

14.2 Karakter Produk

Gambar 14.3 menunjukkan cara membedah karakter produk. Pada bagian tengah adalah informasi tentang produk: persyaratan desain dasar, fungsi, fitur-fiturnya. Konteksnya diatur oleh jawaban atas pertanyaan di kotak sebelah atas: Siapa? Mana? Kapan? Mengapa? Pertimbangkan yang pertama: Siapa? Seorang desainer yang ingin membuat produk yang menarik bagi wanita akan membuat pilihan yang berbeda dari produk untuk anak-anak, orang tua, atau olahragawan. Mana? Produk yang digunakan di rumah memerlukan pilihan bahan dan bentuk yang berbeda dari yang akan digunakan di sekolah atau rumah sakit. Kapan? Ada

produk yang dimaksudkan untuk sekali pakai akan berbeda rancangannya dari yang digunakan untuk sepanjang waktu, untuk acara formal berbeda dengan informal. Mengapa? Produk perlengkapan melibatkan keputusan desain yang berbeda dari gaya hidup.



Gambar 14.3 Pemecahan karakter produk. Konteks mendefinisikan maksud atau mood. Material dan proses menciptakan rupa dan tulang. Antarmuka menentukan kegunaan dan estetika, asosiasi, dan persepsi produk.

Di sebelah kiri lingkaran produk Gambar 14.3 terletak paket informasi tentang bahan dan proses yang digunakan untuk proses pembentukan, assembling, dan finishing. Pemilihan ini menyediakan fungsionalitas. Di sebelah kanan Gambar 14.3 adalah dua paket informasi, sebelah bawah adalah kegunaan yang menunjukkan cara produk berkomunikasi dengan konsumen, berupa interaksi fungsi sensorik, kognitif, dan motorik.

Keberhasilan produk membutuhkan mode operasi yang intuitif dan tidak memerlukan pajak, dapat mengkomunikasikan keadaan produk dan respons pengguna. Personalitas produk berasal dari estetika, asosiasi, dan persepsi. Estetika merangsang panca indera: penglihatan, pendengaran, sentuhan, rasa, dan bau.

Baris pertama dari kotak personality menguraikan: warna, bentuk, tekstur, perasaan, bau, dan suara. Perhatikan mobil baru: gayanya, baunya, suara yang ditimbulkan pintunya pada saat

penutupan. Produk juga memiliki asosiasi pada baris kedua. Asosiasi adalah hal-hal yang kendaraan militer. Pada akhirnya, kualitas yang paling abstrak adalah persepsi. Persepsi adalah reaksi yang diinduksi produk pada pengamat.

Tabel 13.1. Atribut produk

Perception (with Opposite)	
Aggressive – passive	Extravagant – Restrained
Cheap – Expensive	Feminine – Masculine
Classic – trendy	Formal – Informal
Clinical – Friendly	Handmade – mass-produced
Clever – Silly	Honest – Deceptive
Common – Exclusive	Humorous – Serious
Decorated – Plain	Informal – Formal
Delicate – Rugged	Irritating – Lovable
Disposable – Lasting	Lasting – Disposable
Dull – Sexy	Mature – Youthful
Elegant – Clumsy	Retro –Futuristic

Analisis akhir adalah persepsi dari konsumen ketika memilih produk di antara banyak model yang serupa, maka produk harus dapat menciptakan perasaan "harus memiliki". Tabel 1 mencantumkan beberapa persepsi dan kebalikannya untuk mempertajam makna. Persepsi ini dapat diperoleh dari ulasan produk dan majalah khusus dalam desain produk.

14.3 Menggunakan Bahan dan Proses untuk Menciptakan Personaliti Produk

Setiap materi harus digunakan dengan cara yang mengekspos kualitas intrinsik dan tampilan alaminya. Pembuatan tembikar dari tanah liat dan glazes, tukang kayu menggunakan kayu, keterampilan pengrajin perak dan pembuat kaca dalam membuat benda-benda indah yang mengeksploitasi kualitas unik dari material yang dikerjakan dan integritas kerajinan. Integritas desain adalah kualitas yang dinilai oleh konsumen, di samping kualitas lain, seperti humor, simpatik, kejutan, provokasi, bahkan kejutan.

Tabel 14.2 Atribut estetika material

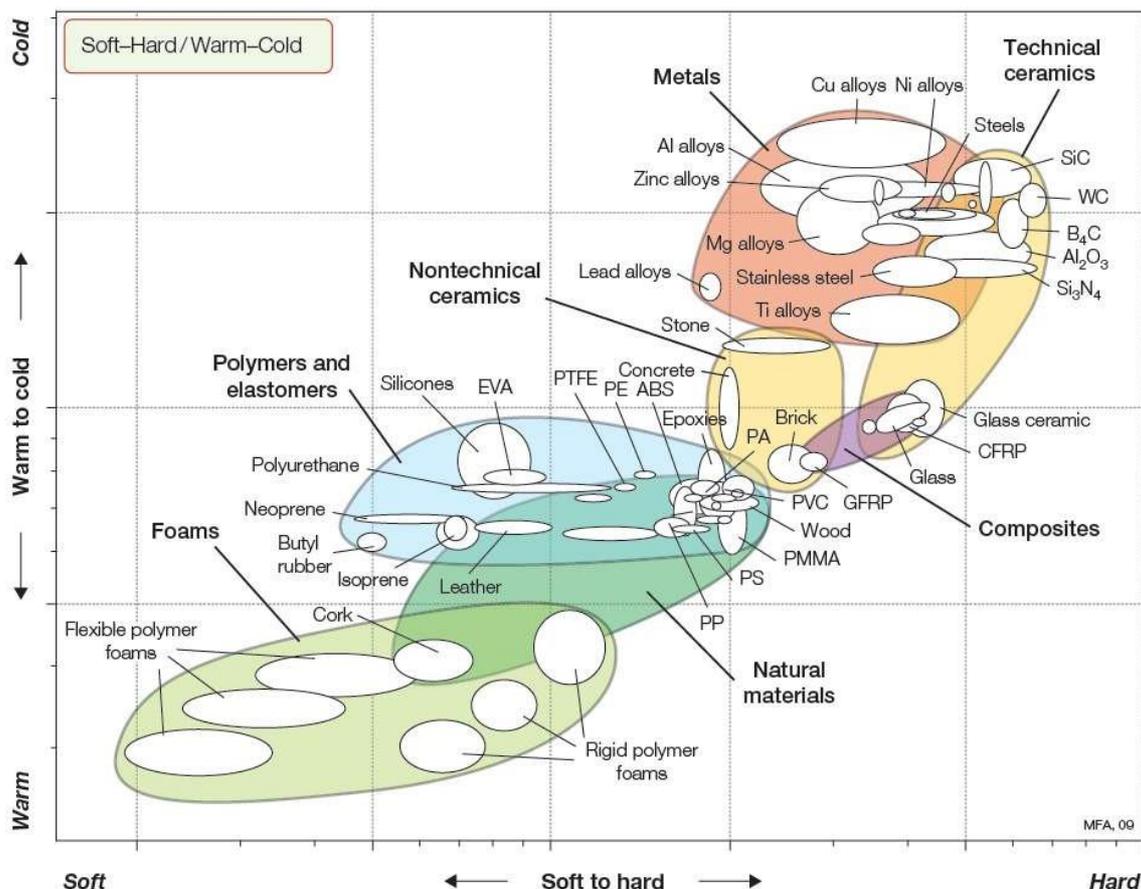
Sense	Attribute	Sense	Attribute
Touch	Warm	Hearing	Muffled
	Cold		Dull
	Soft		Sharp
	Hard		Resonant
	Flexible		Ringing
Stiff	High-pitched		
	Low-pitched		
Sight	Optically clear	Taste	Bitter
	Transparent		Sweet
	Translucent	Smell	
	Opaque		
	Reflective		
	Glossy		
Matte			
Textured			

Atribut Estetika

Atribut estetika adalah sesuatu yang berhubungan dengan indera: sentuhan, penglihatan, pendengaran, rasa, dan bau (Tabel 13.2). Hampir semua orang akan setuju bahwa logam terasa "dingin", gabus itu terasa "hangat", gelas anggur ketika dipukul, "berbunyi". Gelas air polystyrene terlihat tidak dapat dibedakan dari yang terbuat dari kaca, tetapi terasa lebih ringan, kurang dingin, kurang kaku, ketuk dan tidak terdengar sama.

Sentuhan: Lembut-Keras/Hangat-Dingin. Baja dikatakan "keras" seperti gelas, intan lebih keras dari baja dan gelas. Material keras tidak mudah tergores, dapat digunakan untuk menggores material lain. Material ini umumnya menerima polesan tinggi, tahan aus, dan tahan lama. Material keras berkaitan langsung dengan kekerasan Vickers-nya H. Berikut ini adalah contoh atribut sensorik yang berhubungan langsung dengan atribut teknis.

"Soft" merupakan kebalikan dari "hard" tetapi modulus E lebih besar daripada kekerasan H. Material yang lunak akan melentur ketika dibebani, tetapi ketika beban dilepaskan maka akan kembali ke bentuk semula. Elastomer (karet) dan busa polimer terasa lembut. Keduanya memiliki modulus 100-10.000 lebih rendah dari material padat "keras". Lembut hingga keras digunakan sebagai satu sumbu pada Gambar 14.4. Ini menggunakan kuantitas \sqrt{EH} sebagai ukuran.

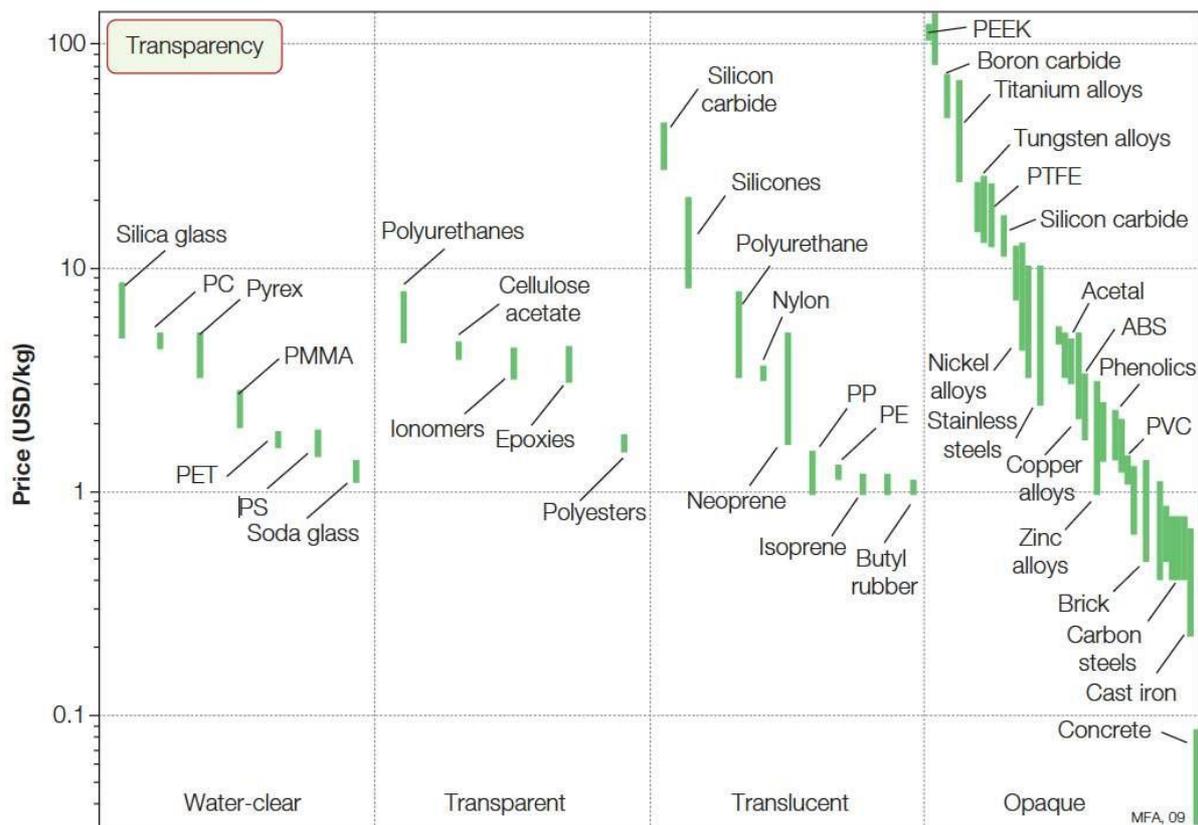


Gambar 14.4. Kualitas sentuh material. Busa dan material alam adalah lembut dan hangat. Logam, keramik dan gelas adalah keras dan dingin. Polimer ada di antara keduanya.

Material terasa "dingin" saat disentuh jika tidak menghantarkan panas. Tetapi terasa hangat saat menghantarkan panas. Hal ini berkaitan dengan konduktifitas termal λ dan panas spesifik C_p . Ukuran dingin atau hangat yang dirasakan adalah kuantitas $\sqrt{\lambda C_p \rho}$. Hal ini ditampilkan sebagai sumbu lain di Gambar 14.4, yang ditampilkan sifat sentuh material. Busa polimer dan kayu dengan densitas rendah terasa hangat dan lembut. Keramik, gelas dan logam terasa dingin dan keras. Polimer dan komposit terletak di antaranya.

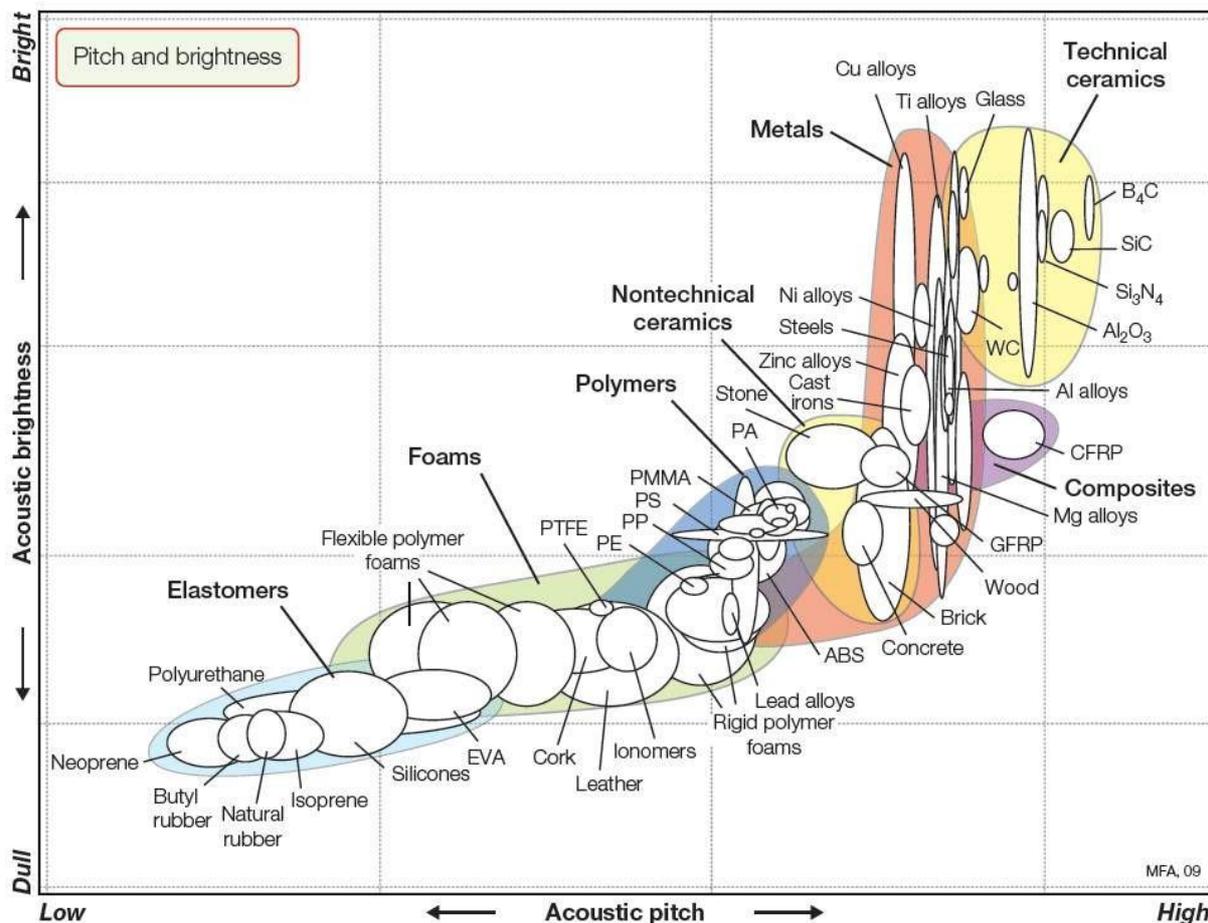
Penampakan: Transparansi, Warna, dan Reflektivitas. Warna logam cenderung buram. Sebagian besar keramik, karena polikritalin dan kristal maka menyebarkan cahaya, buram atau tembus cahaya. Kacamata, dan kristal tunggal beberapa keramik kelihatan transparan. Polimer memiliki keragaman transparansi optik terbesar, mulai dari kualitas optik hingga buram sepenuhnya. Transparansi umumnya dinyatakan dengan 4 peringkat yang menggunakan istilah sehari-hari yang mudah dipahami: “buram”, “tembus cahaya”, “transparan”, dan “air-jernih”.

Gambar 14.5 menunjukkan peringkat transparansi material umum. Material termurah yang menawarkan transparansi berkualitas optik ("kejernihan air") adalah kaca, PS, PET, dan PMMA. Epoksi tampak transparan tetapi tidak sampai derajat kejernihan air. Nilon adalah material tembus cahaya. Semua logam, sebagian besar keramik, dan semua polimer yang diperkuat karbon terlihat buram.



Gambar 14.5. Transparansi diklasifikasikan menjadi 4 peringkat skala titik, dari “air jernih” hingga buram. Material “air-jernih” digunakan untuk jendela atau lensa. Material transparan dan tembus pandang yang meneruskan cahaya tetapi berdifusi. Material yang buram akan menyerap cahaya.

Warna dapat dikuantifikasi dengan menganalisis spektrumnya. Metode yang lebih efektif adalah pencocokan warna dengan menggunakan bagan warna dengan Pantone. Setelah kecocokan ditemukan dapat dijelaskan dengan kode yang dibawa setiap warna. Akhirnya ada reflektivitas, atribut yang sebagian tergantung pada material dan sebagian pada keadaan permukaannya. Transparansi biasanya dijelaskan oleh peringkat: *dead matte, eggshell, semi-gloss, gloss, mirror*.



Gambar 14.6. Sifat akustik material. "Cincin" gelas anggur terjadi karena kaca adalah material yang cerah secara akustik dengan nada alami yang tinggi. Material di kanan atas adalah pilihan yang baik, sedangkan di bagian kiri bawah cocok untuk meredam suara.

Pendengaran: Nada dan Kecerahan. Frekuensi suara yang dipancarkan ketika objek dipukul berkaitan dengan sifat materialnya. Ukuran kasar ini adalah $\sqrt{E/\rho}$ digunakan sebagai sumbu pada Gambar 6. Frekuensi bukan satu-satunya aspek respons akustik, tetapi juga damping atau koefisien rugi-rugi η . Material dengan damping tinggi terdengar kusam dan teredam. Kecerahan akustik (lawan kata "redaman") digunakan sebagai sumbu pada Gambar 14.6. Kelompok material ini memiliki perilaku akustik yang sama.

Perunggu, kaca, dan cincin baja ketika dipukul, suara yang dikeluarkan memiliki nada tinggi sehingga cocok digunakan untuk membuat lonceng. Alumina, memiliki kualitas seperti

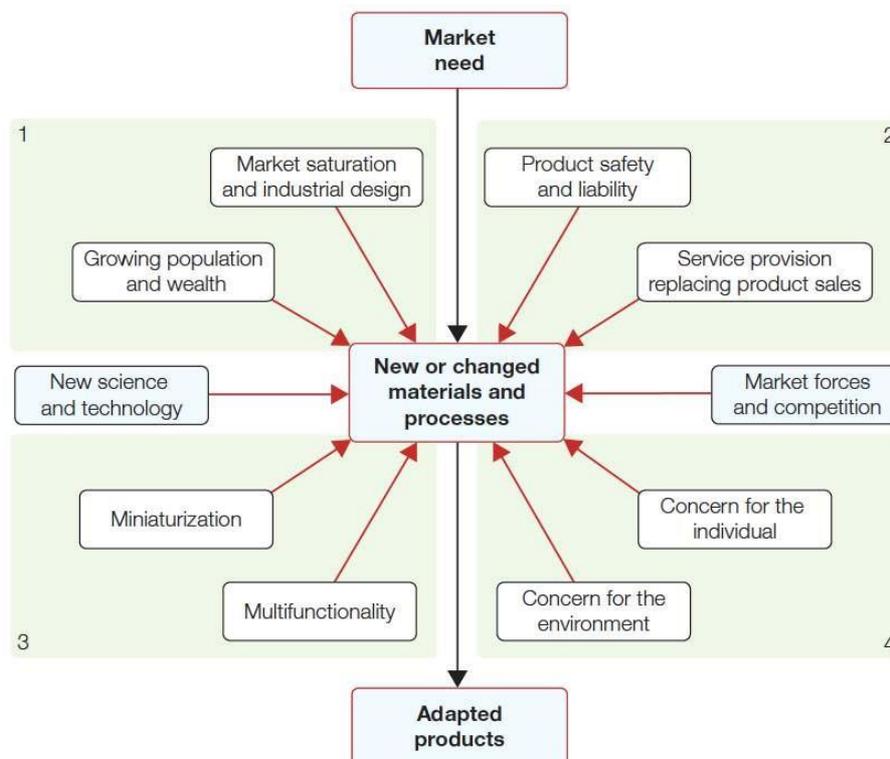
lonceng. Karet, busa, dan banyak polimer terdengar kusam dan bergetar pada frekuensi rendah. Material ini digunakan untuk peredam suara. Timbal cenderung kusam dan bernada rendah digunakan untuk isolasi suara pada gedung-gedung.

Ketiga gambar menunjukkan bahwa setiap kelas material memiliki karakteristik estetika tertentu. Keramik adalah keras, dingin, bernada tinggi, dan cerah secara akustik. Logam relatif keras dan dingin ketika dipukul maka suaranya kusam. Polimer dan busa paling mirip dengan material alami: hangat, lembut, bernada rendah, dan teredam, meskipun beberapa memiliki kejernihan optik yang luar biasa dan hampir semua dapat diwarnai. Tetapi kekerasannya yang rendah berarti bahwa dapat tergores dengan mudah dan kehilangan kilau.

Kualitas material ini berkontribusi terhadap personalitas produk. Produk ini memperoleh beberapa atribut material dari mana dibuat, pengaruh yang desainer kenali dan gunakan untuk menciptakan personalitas. Baja tahan karat, apakah yang ada di dalam mobil atau pada sistem hi-fi, memiliki personalitas yang berbeda dari CFRP, kayu yang dipoles, kulit, dan itu sebagian karena produk telah memperoleh beberapa kualitas estetika material.

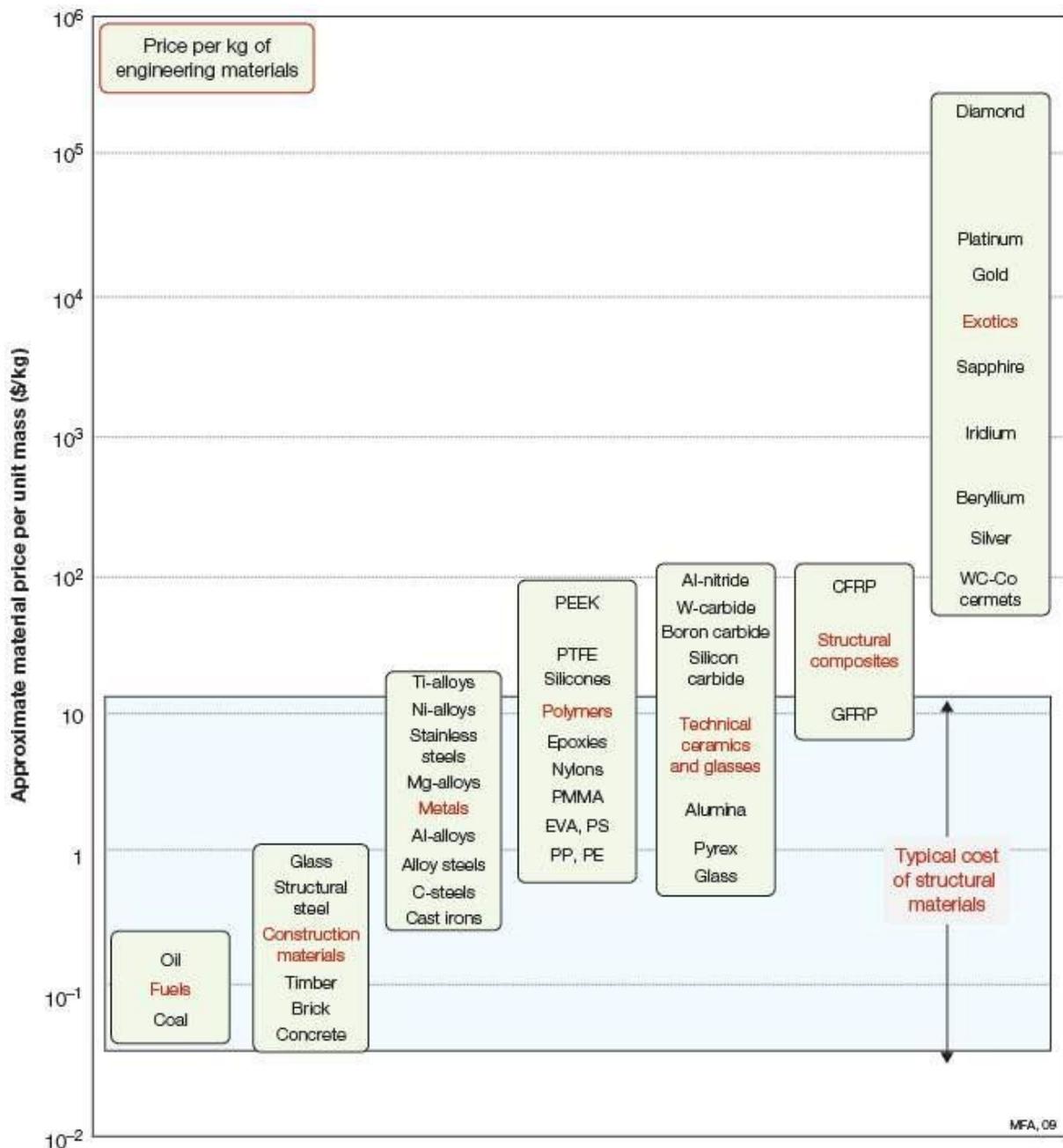
14.4 Daya Tarik Pasar dan Tekanan Sains

Pengguna akhir material adalah industri manufaktur untuk memutuskan material mana yang akan dibeli, dengan menyesuaikan desain serta memanfaatkan dengan sebaik-baiknya. Keputusan penggunaan material didasarkan pada sifat produk. Perekonomian menjadi pertimbangan utama. Sebaliknya, biaya material untuk produk berteknologi tinggi (seperti peralatan olahraga, peralatan militer, proyek ruang angkasa, aplikasi biomedis) tidak menjadi pertimbangan utama.



Gambar 14.7. Kekuatan untuk perubahan. Setiap pengaruh memberikan tekanan untuk mengubah pilihan material dan proses, dan mendorong pengembangan material baru. Daya tarik pasar dan tekanan sains ditunjukkan pada ekstrim kanan dan kiri angka.

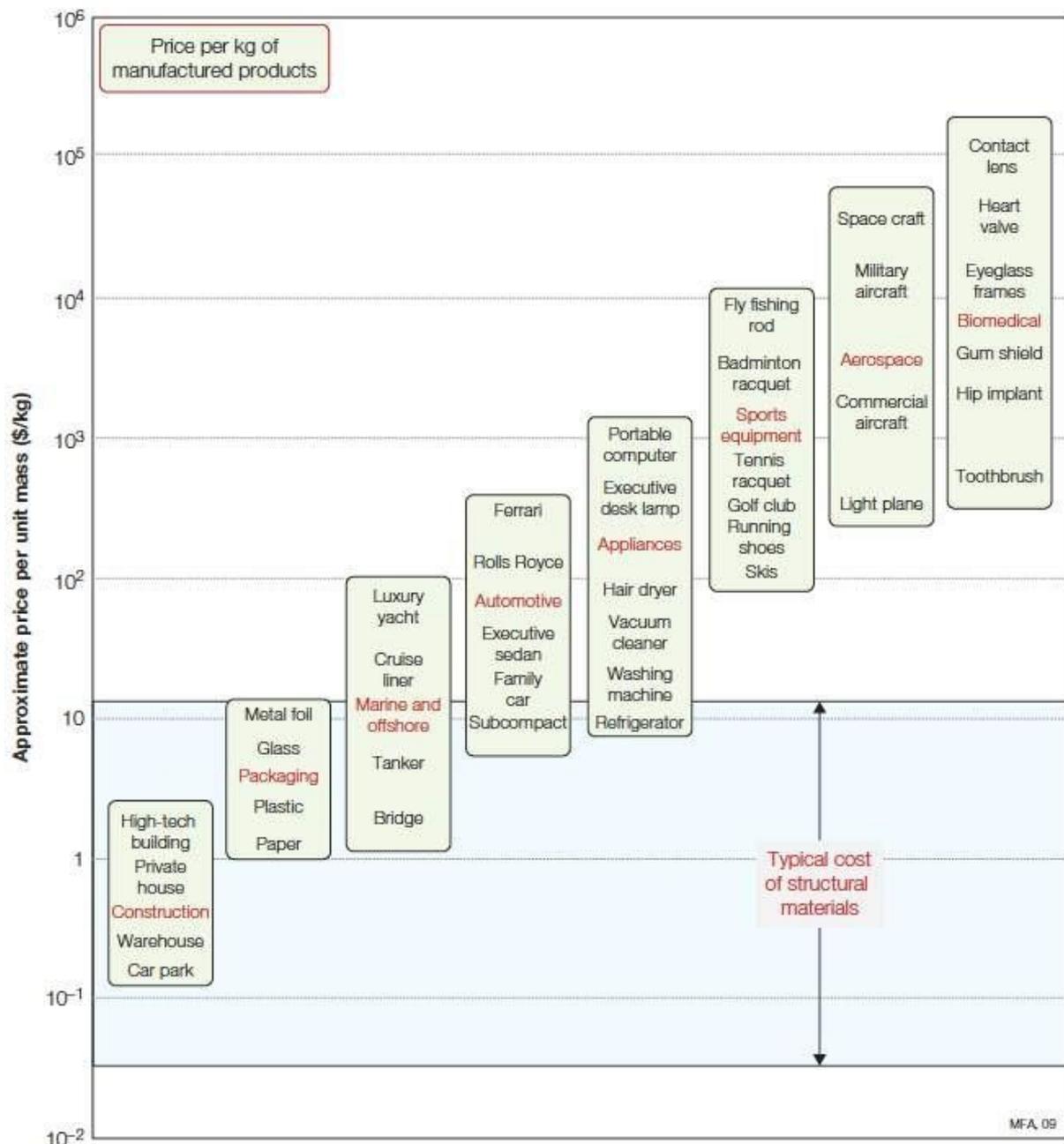
Harga produk di pasaran ditentukan oleh beberapa hal, seperti biaya material yang digunakan, biaya penelitian dan pengembangan desain, biaya pembuatan dan pemasaran, dan nilai yang berkaitan dengan mode, kelangkaan, dan kurangnya persaingan.



Gambar 14.8. Harga material per satuan berat. Bagian yang diarsir adalah material komoditas manufaktur dan konstruksi yang paling banyak digunakan.

Pada Gambar 8, material "komoditas" konstruksi dan manufaktur terletak pada bagian yang diarsir. Biaya material antara \$0.05 dan \$20/kg. Material konstruksi seperti beton, batu bata, kayu, dan baja struktural terletak di sebelah bawah, material berteknologi tinggi seperti paduan titanium berada di atasnya. Polimer berada pada daerah yang sama, polietilena di

bagian bawah, polytetrafluorethylene (PTFE) berada di tepi bagian atas. Komposit terletak lebih tinggi, dengan GFRP di bagian bawah dan CFRP di bagian atas. Keramik rekayasa masih lebih tinggi, meskipun ini berubah seiring dengan meningkatnya produksi.



Gambar 14.9. Harga produk per kg. Bagian yang diarsir adalah di mana sebagian besar material dibuat. Produk dalam daerah diarsir berupa material padat.

Harga produk per kg (Gambar 14.9) menunjukkan distribusi yang berbeda. Delapan sektor pasar yang ditunjukkan mencakup sebagian besar industri manufaktur. Bagian yang diarsir mencakup biaya material komoditas. Sektor dan produk pada daerah arsiran memiliki biaya material sekitar 50% dalam konstruksi sipil, struktur laut besar, dan 20% untuk kemasan konsumen. Nilai tambah dalam mengkonversi material ke produk di sektor-sektor ini relatif

rendah, tetapi volume pasarnya besar. Kriteria pemilihan material adalah biaya serendah mungkin.

Produk di bagian atas diagram secara teknis lebih canggih. Biaya material yang dibuat kurang dari 10%, kadang-kadang kurang dari 1% dari harga produk. Nilai tambah material selama proses manufaktur tinggi. Daya saing produk berkaitan erat dengan kinerja material. Daya tarik pasar dalam hal ini adalah kinerja, dengan biaya sebagai pertimbangan sekunder. Volume yang lebih kecil dengan nilai tambah yang lebih tinggi mendorong pengembangan material baru atau meningkatkan kinerja material, seperti material yang lebih ringan, lebih kaku, lebih kuat, lebih keras, ekspansi lebih sedikit, atau sebagai konduktor yang lebih baik.

14.5 Populasi Pertumbuhan dan Kejenuhan Pasar

Populasi tingkat kesejahteraan yang lebih tinggi akan mengkonsumsi lebih banyak produk. Jika menginginkan produk, seperti ponsel, kulkas, dan mobil dapat saja menjadi produk yang ditunggu-tunggu. Tenaga marketing memandu user untuk memilih, dari berbagai produk yang hampir identik dengan harga yang hampir identik, yang diinginkan konsumen.

Konsekuensi dari kondisi ini adalah peningkatan konsumsi energi dan material yang masif dan berkelanjutan. Hal ini dapat menjadi kekuatan untuk mengubah dalam pemilihan materi. Kejenuhan pasar harus diantisipasi oleh desainer dengan mencari cara baru untuk menarik konsumen.

14.6 Tanggung Jawab Produk dan Penyediaan Layanan

Kententuan sebuah negara menyatakan bahwa jika suatu produk mengalami kegagalan, maka harus ditarik kembali dan kegagalan itu harus diperbaiki. Penarikan produk sangat mahal dan merusak citra perusahaan. Semakin tinggi grafik yang ditunjukkan pada Gambar 9, semakin besar kemungkinan terjadinya kegagalan.

Keandalan dan reproduksi memerlukan kontrol proses yang canggih dan bahwa setiap aspek produksi harus dipantau dan diverifikasi. Baja, paduan aluminium dengan kontrol komposisi yang ketat, kontrol umpan balik real-time pemrosesan, pengujian nondestruktif untuk kualitas dan integritas.

14.7 Miniaturisasi dan Multifungsi

Pemutar CD dan DVD membutuhkan kemampuan untuk memposisikan read-head dengan presisi mikron. MEMS (*miniature electro-mechanical systems*), sebagai akselerometer yang memicu kantung udara mobil, balok kantilever dengan ketebalan mikron yang melentur karena gaya inersia. Semakin kecil komponen perangkat dibuat, maka semakin besar fungsionalitas yang dapat dikemas ke dalamnya. Ponsel, PDA, dan pemutar MP3 adalah perangkat portabel yang sangat kecil sehingga cocok di saku jaket. Semua melibatkan komponen dengan fungsi mekanis: perlindungan, posisi, aktuasi, penginderaan, casing, hard disk, keyboard, perlindungan termal dan kejutan.

Miniaturisasi akan memaksa kebutuhan material baru. Ketika perangkat menjadi lebih kecil, maka kegagalan mekanis akan menjadi pembatas desain. Perangkat yang lebih kecil maka kebutuhan materialnya berkurang. Konsumen menginginkan ukuran kecil dengan

fungsionalitas yang kuat dapat meningkatkan harga produk itu. Biaya material tidak lagi membatasi pilihan. Produk skala mikron dengan kepresisian menghadirkan tantangan manufaktur yang baru.

14.8 Kepedulian Lingkungan dan Individu

Energi dari bahan bakar fosil menyebabkan negara-negara berkembang mencapai kehidupan yang sejahtera dan nyaman. Pembakaran hidrokarbon akan membebani lingkungan. Perubahan langkah agar pembangunan berkelanjutan jangka panjang dapat dilakukan maka perlu mengubah cara manufaktur, transportasi, dan memiliki dampak besar terhadap cara pengolahan material.

Dimungkinkan untuk menggunakan teknologi sel bahan bakar, energi dari sumber alami, dan tenaga nuklir yang aman sebagai cara modern. Pada tingkat pertumbuhan global 3% per tahun, diperlukan proses penambangan, proses manufaktur, dan pengolahan limbah dalam 25 tahun ke depan.

Sebagian besar organ dalam tubuh manusia melakukan fungsi mekanis yang dominan. Gigi untuk memotong dan menggiling, tulang untuk mendukung beban struktural, sendi untuk memungkinkan artikulasi, jantung untuk memompa darah, dan arteri untuk membawa darah di bawah tekanan ke tubuh, otot untuk beraktiasi, kulit untuk memberikan perlindungan yang fleksibel. Implan gigi dan tulang buatan manusia, penggantian sendi pinggul dan lutut, arteri dan kulit buatan, bahkan hati, sudah ada dan banyak digunakan. Tetapi harganya saat ini sangat mahal. Kondisi ini akan merangsang penelitian tentang material yang terjangkau untuk organ buatan.

Penanggulangan eksklusi desain adalah prioritas negara-negara berkembang dan dipandang penting oleh pembuat produk. Kondisi ini berpengaruh terhadap pemilihan material, perubahan batasan dan tujuan. Penggunaan material dengan warna atau rasa, mengkomunikasikan fungsi kontrol, memberikan cengkeraman yang baik, isolasi, atau perlindungan akan menjadi prioritas.

Referensi

1. Ahmet Aran, 2007, Manufacturing Properties of Engineering Materials, ITU Department of Mechanical Engineering.
2. Dietmar Gross, Werner Hauger, Jorg Schoder, Wolfgang A. Wall, Javier Bonet, 2018, Engineering Mechanics 2: Mechanics of Materials, Springer-Verlag GmbH Germany.
3. J.W. Martin, 2006, Materials for engineering, CRC Press
4. K.G. Swift, J.D. Booker, 2003, Process Selection from Design to Manufacture, Butterworth-Heinemann.
5. Krishan K. Chawla, 2012, Composite Materials: Science and Engineering, Springer Science & Business Media.
6. Mahmoud M. Farag, 2014, Materials and Process Selection for Engineering Design, CRC Press.
7. Michael F. Ashby, 2011, Materials Selection in Mechanical Design 4th Edition, Butterworth-Heinemann.
8. Miltiadis A. Boboulos, 2010, Manufacturing Processes and Materials: Exercises, Book Boon.
9. William D. Callister, David G. Rethwisch, 2010, Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley & Sons, Inc.