



PENGANTAR MATERIAL TEKNIK

Muhammad Syarif, Imah Luluk Kusminah, Arqam Laya, Habibi Santoso, Jan Setiawan, Gideon Kajang, Wenny Marthiana, Badaruddin Anwar, Rahmad Surya Hadi Saputra, Ludvi Arif Wibowo, Cahyo Wibowo, Nenny Roostrianawaty. Luluk Edahwati

ISBN 978-634-255-777-8

PENGANTAR MATERIAL TEKNIK

Muhammad Syarif
Imah Luluk Kusminah
Arqam Laya
Habibi Santoso
Jan Setiawan
Gideon Kajang
Wenny Marthiana
Badaruddin Anwar
Rahmad Surya Hadi Saputra
Ludvi Arif Wibowo
Cahyo Wibowo
Nenny Roostrianawaty
Luluk Edahwati

GET PRESS INDONESIA

PENGANTAR MATERIAL TEKNIK

Penulis :
Muhammad Syarif
Imah Luluk Kusminah
Arqam Laya
Habibi Santoso
Jan Setiawan
Gideon Kajang
Wenny Marthiana
Badaruddin Anwar
Rahmad Surya Hadi Saputra
Ludvi Arif Wibowo
Cahyo Wibowo
Nenny Roostrianawaty
Luluk Edahwati
ISBN : 978-634-255-777-8

Editor :
DR., D.Sc., Drs. Sunarno SastroAtmodjo, S.E., S.H., S.T., S.AP., S.IP., S.Sos., S.IKom., M.M., M.Si.
Desain Sampul dan Tata Letak : Dede Ahsani Aulia ST.

PENERBIT : GET PRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022
Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Oktober 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga buku *Pengantar Material Teknik* ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai referensi untuk memahami berbagai konsep dasar dan perkembangan material teknik, mulai dari struktur atom dan ikatan kimia, sifat mekanik, termal, elektrik, dan magnetik, hingga material keramik, polimer, komposit, proses pembuatan, serta karakterisasi material. Selain membahas material konvensional, buku ini juga memuat aplikasi material teknik, material untuk energi dan lingkungan, serta perkembangan material masa depan yang berkaitan dengan nanoteknologi, material cerdas, material berkelanjutan, dan pemanfaatan sumber daya terbarukan.

Penyusunan buku ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang sistematis dan mudah diterapkan bagi mahasiswa, akademisi, praktisi, maupun pembaca yang ingin memperluas wawasan di bidang material teknik. Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan pada edisi berikutnya. Semoga buku *Material Teknik* ini dapat memberikan manfaat dan menjadi salah satu sumber referensi dalam mendukung proses pembelajaran, penelitian, serta pengembangan teknologi material yang inovatif dan berkelanjutan.

Padang, Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTAR MATERIAL TEKNIK i

KATA PENGANTAR i

DAFTAR ISI ii

DAFTAR GAMBAR vii

DAFTAR TABEL xi

BAB 1 PENGANTAR MATERIAL TEKNIK 1

1.1 Hakikat dan Ruang Lingkup Material Teknik 1

1.2 Struktur, Ikatan Atom, dan Mikrostruktur Material 4

1.3 Klasifikasi Material Teknik 7

1.4 Sifat Material dan Hubungannya dengan Kinerja 11

1.5 Pemilihan, Pengujian, dan Perkembangan Material Teknik 14

BAB 2 STRUKTUR ATOM DAN IKATAN KIMIA 19

2.1 Struktur Atom 19

2.2 Elektron dalam Atom 21

2.3 Tabel Periodik 32

2.4 Elektron Dalam Atom 35

2.5 Ikatan Antar Atom 39

2.6 Ikatan Sekunder (Gaya Van der Waals) 47

BAB 3 SIFAT MEKANIK MATERIAL 53

3.1 Konsep Tegangan dan Regangan 53

3.2 Kekuatan Material sebagai Sifat Mekanik 60

3.3 Sifat Mekanik Lainnya 63

3.5 Sifat Mekanik pada Beberapa Material 68
3.6 Faktor yang Mempengaruhi Sifat Mekanik 76
3.7 Pengujian Sifat Mekanik 79
BAB 4 SIFAT TERMAL MATERIAL 83
4.1 Dasar Dasar Perpindahan Panas 84
4.2 Sifat-Sifat Termal Material 86
4.3 Metode Pengujian Sifat Termal Material 90
BAB 5 SIFAT ELEKTRIK DAN MAGNETIK MATERIAL 93
5.1 Klasifikasi Material 93
5.2 Sifat dan Konduksi Elektrik 96
5.3 Sifat Magnetik Material 104
BAB 6 MATERIAL KERAMIK 117
6.1 Struktur dan Ikatan Atom Keramik 119
6.2 Ikatan Atom pada Material Keramik 122
6.3 Sifat-Sifat Materil Keramik 125
6.4 Aplikasi Material Keramik 131
BAB 7 MATERIAL POLIMER 137
7.1 Pengertian Material Polimer 137
7.2 Sejarah Perkembangan Polimer 137
7.3 Revolusi Plastik Sintetis 138
7.4 Perkembangan Polimer Modern 139
7.5 Klasifikasi Material Polimer 140
7.6 Struktur Atom Penyusun Polimer 145
7.7 Proses Pembentukan Polimer 153
7.8 Sifat Material Polimer 158

7.9 Proses Manufaktur Material Polimer 162
BAB 8 MATERIAL KOMPOSIT 175
8.1 Definisi Material Komposit 177
8.2 Jenis-Jenis Material Komposit 184
8.3 Keunggulan dan Kekurangan Material Komposit 185
8.4 Struktur Umum Material Komposit 185
8.5 Jenis Penguat dalam Material Komposit 186
8.6 Orientasi dan Distribusi Penguat 187
8.7 *Interface*: Antarmuka Matriks dan Penguat 188
8.8 Sifat-Sifat Mekanik Material Komposit 188
BAB 9 PROSES PEMBUATAN MATERIAL 191
9.1 Pengolahan Material 193
9.2 Perekayasaan Material 205
BAB 10 KARAKTERISASI MATERIAL 217
10.1 Karakterisasi Material 217
10.2 Analisis Struktur & Morfologi Material 219
10.3 Analisis Struktur Kristal 226
10.4 Analisis Komposisi Material 232
10.5 Analisis Termal 237
BAB 11 APLIKASI MATERIAL TEKNIK 243
11.1 Klasifikasi dan Karakteristik Material Teknik 245
11.3 Aplikasi Material Konvensional 250
11.4 Material Canggih dan Tren Masa Depan 267
11.5 Studi Kasus Aplikasi Material Teknik di Indonesia 272

BAB 12 MATERIAL UNTUK ENERGI DAN LINGKUNGAN 277

12.1 Konsumsi Energi dan Dampak Lingkungan 279

12.2 Material Konstruksi Hemat Energi 281

12.3 Material Ramah Lingkungan untuk Konstruksi 286

12.4 Material untuk Infrastruktur Energi dan Utilitas 290

12.5 Material untuk Pengendalian Lingkungan dalam Teknik Sipil 292

12.6 Durabilitas dan Ketahanan Lingkungan 294

12.7 Penilaian Keberlanjutan Material Konstruksi 295

12.8 Inovasi Material Masa Depan Untuk Teknik Sipil 296

12.9 Implementasi Material Berkelanjutan 297

BAB 13 MASA DEPAN MATERIAL TEKNIK 301

13.1 Perkembangan Material Teknik Masa Depan 303

1.3.2 Material Ringan Berkekuatan Tinggi 306

13.3 Material Multifungsi 308

13.4 Material Berbasis Nanoteknologi 311

13.5 Material Cerdas dan Adaptif (*Smart & Functional Materials*) 316

13.6 Material Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan 322

13.7 Material Berbasis Sumber Daya Terbarukan 323

13.8 Material Daur Ulang dan Efisiensi Sumber Daya 324

13.8 Perkembangan Proses Manufaktur untuk Material Masa Depan 325
13.9 Perkembangan Material terhadap Dunia Teknik Mesin 328
13.10 Pemilihan Material dalam Desain Mesin Modern 330
13.11 Material untuk Efisiensi Energi dan Keberlanjutan Sistem Produksi 331
13.12 Peran Insinyur Mesin dalam Inovasi Material Teknik 334
DAFTAR PUSTAKA 337
INDEKS 352
GLOSARIUM 356
BIODATA PENULIS 372

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Model atom Bohr 22
Gambar 2. 2 (a) Tiga Level Energi Awal untuk Elektron Dalam Atom Hidrogen Menurut Model Niels Bohr. (b) Tingkat Energi Elektron untuk Tiga Lapisan Pertama dalam Atom Hidrogen Menurut Model Mekanika Gelombang 23
Gambar 2. 3 Perbandingan antara (a) Model Atom Bohr dan (b) Model Atom Mekanika Gelombang dalam Hal Distribusi Elektron (John Wiley & Sons, 1987) 24
Gambar 2. 4 Ilustrasi Skematik Energi Relatif Elektron 29
Gambar 2. 5 Ilustrasi Skematis Keadaan Energi Pada Atom Natrium 30
Gambar 2. 6 (a) Hubungan Antara Gaya Tolak, Gaya Tarik, dan Gaya Resultan Terhadap Perubahan Jarak Antaratom Pada Dua Atom Yang Terisolasi. (b) Hubungan Antara Energi Potensial Gaya Tolak, Energi Potensial Gaya Tarik, Dan Energi Total Terhadap Jarak Antaratom Pada Dua Atom Yang Terisolasi 37
Gambar 2. 7 Representasi Skematis Ikatan Ionik Dalam Natrium Klorida (NaCl) 40
Gambar 2. 8 Gambaran Skematis Ikatan Kovalen Metana 43
Gambar 2. 9 Ilustrasi Skematis Dari Ikatan Logam 45
Gambar 2. 10 Ikatan van der Waals 49
Gambar 2. 11 Representasi Skematis dari (a) Atom yang Simetris Secara Listrik dan (b) Dipol Atom Terinduksi 49
Gambar 2. 12 Gambaran Skematis Representasi HCl 50
Gambar 2. 13 Representasi Skematis Ikatan Hidrogen dalam HF 51
Gambar 2. 14 Hubungan Tegangan Regangan 57
Gambar 4. 1 *Heat Exchanger* 85
Gambar 4. 2 Struktur Mikro Material Logam 86
Gambar 4. 3 Turbin Angin 90
Gambar 5. 1 Sifat Kelistrikan Beserta Contoh Materialnya 94
Gambar 5. 2 Klasifikasi Material Berdasarkan Respons Magnetik 95

Gambar 5. 3Mekanisme Konduksi....104
Gambar 5. 4 Sifat Magnetik Pada Material....111
Gambar 5. 5 Kurva Histeresis....115
Gambar 6. 1 Mekanisme Ikatan Ionik....123
Gambar 6. 2 Mekanisme Ikatan Kovalen....124
Gambar 6. 3 Ketahanan Material Keramik Pada Temperature Tinggi....128
Gambar 7. 1 Kebun Karet....138
Gambar 7. 2 Produk Polymer Alami....138
Gambar 7. 3Transformasi Plastik....139
Gambar 7. 4 Perkembangan Polymer Modern....140
Gambar 7. 5 Struktur Kristalin....151
Gambar 7. 6 Contoh Jenis Kristalin....153
Gambar 7. 7 Tahapan Polimerisasai Adisi....155
Gambar 7. 8 Skema Proses Injeksi Molding....164
Gambar 7. 9 Skema Proses Ekstrusi....165
Gambar 7. 10 Skema Proses Blow Moulding....166
Gambar 7. 11 Skema Proses Ekstrusi....167
Gambar 7. 12 Skema Proses Thermoforming....168
Gambar 7. 13 Skema Proses *Thermoforming*....169
Gambar 7. 14 Jenis Cacat Produk Polymer....171
Gambar 8. 1Klasifikasi Komposit (Cwala, 2012)....180
Gambar 8. 2 Komposit (*Science and Education Publishing*)....184
Gambar 9. 1 Pengecoran Logam....195
Gambar 9. 2 Pembentukan Logam....198
Gambar 9. 3 Pengelasan Logam....200
Gambar 9. 4 Perlakuan Panas Pada Material Logam....203
Gambar 9. 5 Contoh Skema Mikrostruktur....208
Gambar 9. 6 Ilustrasi Nano Material....211
Gambar 9. 7 Contoh Material Cerdas Termokromik (*Themocromic*)....212
Gambar 9. 8 Contoh Komposit Besi....214
Gambar 10. 1 Mikroskopi Optik....221
Gambar 10. 2 Skematik Teknis Untuk *Scanning Electron Microscopy* (SEM)....223
Gambar 10. 3 Skematik Teknis Untuk Instrumen *Tranmission Electron Microscopy (TEM)*....225
Gambar 10. 4 Diagram Skematik Instrumen Diffraksi X-Ray....229
Gambar 10. 5 Kurva *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*....239

Gambar 11. 1 Peta Konsep Hubungan Struktur, Sifat, Pemrosesan, Dan Kinerja Material 244
Gambar 11. 2 Diagram Empat Kuadran Material Teknik (Logam, Keramik, Polimer, Komposit) 245
Gambar 11. 3 (a) GFRP dan (b) CFRP 248
Gambar 11. 4 Diagram Panduan Pemilihan Bahan Berdasarkan Aplikasi 249
Gambar 11. 5 Aplikassi logam Pada Industri 251
Gambar 11. 6 Padual Logam dan Aplikasinya 252
Gambar 11. 7 Baja untuk Konstruksi Bangunan Gedung 253
Gambar 11. 8 Aplikasi Material Campuran untuk Industri Otomotif 254
Gambar 11. 9 Material Paduan dalam Industri Penerbangan 255
Gambar 11. 10 Stainless Stell Sebagai Material Industri Medis 256
Gambar 11. 11 (a) Ubin Keramik Lantai, (b) Isolator Listrik Tegangan Tinggi, (c) Implan Panggul Buatan Dari Zirkonia. 257
Gambar 11. 12 Diagram Jenis Polimer 259
Gambar 11. 13 Diagram aplikasi polimer 260
Gambar 11. 14 (a) Kemasan Makanan dari PET, (b) Bemper Mobil Polipropilen, (c) Sarung Tangan Medis dari Lateks, (d) Casing Ponsel Polikarbonat. 261
Gambar 11. 15 Struktur Material Komposit 264
Gambar 11. 16 (a) Badan Pesawat Boeing 787 yang 50% Terdiri dari CFRP, (b) Komponen Interior Mobil Listrik dari Komposit Serat Rami, (c) Raket Tenis Serat Karbon 266
Gambar 11. 17 Diagram Jenis Material Nano 268
Gambar 11. 18 Ilustrasi Struktur Graphene (Kisi Heksagonal) dan Perbandingan Skala Nano (Rambut Manusia ~80.000 nm, Graphene ~0,3 nm) 269
Gambar 11. 19 (a) Papan Panel Dari Komposit Serat Bambu dan Resin Daur Ulang, (b) Komponen Interior Mobil Listrik dari Serat Rami/ PLA. 271
Gambar 11. 20 Penelitian Komposit Serat Rami Untuk Interior Mobil 273
Gambar 11. 21 (a) Rangka eSAF, (b) Serat Rami/PLA. 274
Gambar 13. 1 Perkembangan Material Teknik Masa Depan Sesuai Fungsinya 304
Gambar 13. 2 Aplikasi Komposit Serat Karbon dalam Berbagai 308

Gambar 13. 3 Integrasi Sifat Material 310
Gambar 13. 4 Material Nanoteknologi 311
Gambar 13. 5 Reduksi ion Ag+ 313
Gambar 13. 6 Cacat Kristal 314
Gambar 13. 7 *Smart & Functional Materials* 317
Gambar 13. 8 Aplikasi dari Material Cerdas dan Adaptif 318
Gambar 13. 9 *Shape Memory Alloys* (SMA) 320
Gambar 13. 10 Material Piezoelektrik (Mikrofon) 321
Gambar 13. 11 Material terbarukan 324
Gambar 13. 12 Daur Ulang Material 325
Gambar 13. 13 Perkembangan Proses Manufaktur Material Masa Depan 328
Gambar 13. 14 Material Ramah Limgkungan 329
Gambar 13. 15 Material Unggul 331
Gambar 13. 16 Material Ringan dengan Kekuatan Tinggi 332
Gambar 13. 17 Pengembangan Material untuk Teknologi Masa Depan 335

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Pengelompokan Sifat Material dan Karakteristiknya 9
Tabel 2. 1 Jumlah Elektron di Beberapa Kulit dan Subkulit 26
Tabel 2. 2 Periodik Semua Unsur 33
Tabel 2. 3 Nilai Elektronegativitas Semua Unsur 35
Tabel 6. 1 Perbandingan Ikatan Ionik dan Kovalen pada Keramik 119
Tabel 6. 2 Jenis Struktur Kristal pada Material Keramik 121
Tabel 6. 3 Sifat-Sifat Utama Material Keramik 131
Tabel 6. 4 Aplikasi Material Keramik dalam Berbagai Bidang 136
Tabel 7. 1 Contoh Material Thermoplastis dan Aplikasinya 142
Tabel 7. 2 Contoh Material Thermoset dan Aplikasinya 142
Tabel 7. 3 Contoh Material Thermoset dan Aplikasinya 143
Tabel 7. 4 Perbandingan Jenis Polimer 144
Tabel 7. 5 Klasifikasi Polymer Berdasarkan Sumber 144
Tabel 7. 6 Struktur Rantai Polimer 147
Tabel 7. 7 Sifat Polimer terhadap Peningkatan Derajat Polimer 148
Tabel 7. 8 Contoh Hubungan DP dan Sifat Material 149
Tabel 7. 9 Karakteristik Kristalin 151
Tabel 7. 10 Interpretasi Nilai Derajat Kristalinitas 152
Tabel 7. 11 Perbandingan Metoda Pembentukan Polimer 155
Tabel 7. 12 Perbandingan Sifat Mekanik Beberapa Polymer 160
Tabel 7. 13 Beberapa Sifat Termal Polymer 161
Tabel 9. 1 Pengujian Kekerasan Rockwell C Setelah Dilakukan Perlakuan Panas 205
Tabel 10. 1 Klasifikasi Metode Karakterisasi 218
Tabel 10. 2 Matriks Perbandingan Instrumen Analisis Struktur & Morfologi 226
Tabel 10. 3 Perbedaan Karakteristik difraksi material 231
Tabel 10. 4 Perbandingan Instrumen Analisis Komposisi Kimia 236
Tabel 10. 5 Perbandingan antara *TGA* dan *DSC* 241
Tabel 11. 1 Perbandingan Sifat Mekanik dan Fisik Keempat Kelas Material 246
Tabel 11. 2 Aplikasi Paduan Logam Utama Di Industry 252
Tabel 11. 3 Jenis Keramik dan Aplikasinya 257
Tabel 11. 4 Perbandingan Termoplastik dan Termoseting 262

Tabel 11. 5 Perbandingan Komposit Serat Karbon (CFRP) vs Paduan Aluminium 267
Tabel 11. 6 Jenis – Jenis Material Cerdas dan Aplikasinya 270
Tabel 11. 7 Ringkasan studi kasus material di Indonesia 274
Tabel 12. 1 Contoh Embodied Energy Material Konstruksi 281
Tabel 12. 2 Nilai Konduktivitas Termal Material Insulasi 283
Tabel 12. 3 Perbandingan Beton Konvensional dan *Green Concrete* 287
Tabel 12. 4 Material Untuk Pengendali Lingkungan 294
Tabel 12. 5 Faktor Penyebab Kerusakan Material Konstruksi 295
Tabel 12. 6 Inovasi Material Masa Depan 297

BAB 1
PENGANTAR MATERIAL TEKNIK

1.1 Hakikat dan Ruang Lingkup Material Teknik

Material teknik adalah bidang kajian yang mempelajari hubungan antara komposisi, struktur, proses pembuatan, sifat, dan kinerja material ketika digunakan dalam produk atau sistem rekayasa. Dalam kegiatan teknik, material bukan sekadar bahan mentah, melainkan bagian dari keputusan desain yang menentukan apakah suatu komponen mampu menahan beban, bekerja pada suhu tertentu, tahan terhadap lingkungan, mudah diproses, ekonomis, serta aman selama masa pakai. Karena itu, pengantar material teknik perlu dipahami sebagai fondasi lintas disiplin yang menghubungkan ilmu fisika, kimia, mekanika, manufaktur, dan desain produk.

Secara umum, studi material teknik berangkat dari pertanyaan sederhana: mengapa suatu material dipilih untuk aplikasi tertentu? Jawabannya tidak cukup hanya dengan menyebut kuat atau murah. Pemilihan material harus mempertimbangkan sifat mekanik, sifat fisik, sifat kimia, kemudahan produksi, ketersediaan, dampak lingkungan, dan kemampuan material mempertahankan performa dalam kondisi pelayanan. Prinsip ini sejalan dengan gagasan bahwa pemahaman material harus mengaitkan struktur internal dengan sifat serta proses pembentukannya (Callister & Rethwisch, 2020).

Dalam konteks pendidikan teknik, pembahasan material biasanya dimulai dari jenis-jenis material, dilanjutkan dengan struktur atom dan mikrostruktur, kemudian sifat material, pengujian, kegagalan, dan pemilihan material. Menempatkan material sebagai unsur penting dalam pekerjaan keteknikan karena pemilihan bahan akan memengaruhi kekuatan, keawetan, biaya, dan mutu produk, (Syarif dkk, 2024). Dengan kata lain, seorang perancang yang memahami material akan lebih mampu membuat produk yang bukan hanya berfungsi, tetapi juga dapat diproduksi, dirawat, dan digunakan secara aman.

Ruang lingkup material teknik mencakup tiga tingkat pengamatan. Tingkat pertama adalah tingkat atomik, yaitu cara atom tersusun, jenis ikatan antaratom, dan energi yang mengikat atom tersebut. Tingkat kedua adalah tingkat mikrostruktur, yaitu susunan butir, fasa, cacat kristal, pori, serat, partikel penguat, dan bentuk internal lain yang hanya tampak melalui mikroskop. Tingkat ketiga adalah tingkat makroskopik, yaitu sifat yang dapat diamati dan diukur pada komponen nyata, seperti kekuatan tarik, kekerasan, ketangguhan, konduktivitas, massa jenis, atau ketahanan korosi.

Ketiga tingkat tersebut saling berkaitan. Baja, misalnya, dapat memiliki kekuatan berbeda meskipun komposisi kimianya mirip, karena perlakuan panas mengubah fasa dan ukuran butirnya. Polimer dapat menjadi lentur atau kaku bergantung pada struktur rantai, derajat kristalinitas, dan bahan tambah. Keramik dapat sangat keras, tetapi rapuh karena ikatan atomnya kuat dan pergerakan dislokasinya terbatas. Komposit dapat memadukan serat yang kuat dengan matriks yang ringan sehingga menghasilkan kombinasi sifat yang tidak mudah dicapai oleh material tunggal.

Oleh sebab itu, material teknik tidak dapat dipahami hanya dari nama material. Istilah aluminium, baja, plastik, atau keramik masih terlalu umum. Dalam praktik, harus diketahui jenis paduan, komposisi, proses pembentukan, kondisi perlakuan panas, standar mutu, dan batas operasinya. Baja karbon rendah berbeda dari baja tahan karat; aluminium murni berbeda dari paduan aluminium seri 6000; polietilena berdensitas rendah berbeda dari polietilena berdensitas tinggi. Perbedaan ini memperlihatkan bahwa material teknik adalah ilmu tentang detail, karena perubahan kecil pada komposisi atau proses dapat menghasilkan perubahan sifat yang besar.

Material teknik juga memiliki sisi praktis yang kuat. Insinyur harus mampu membaca lembar data material, memahami standar pengujian, menafsirkan grafik tegangan-regangan, menghitung faktor keamanan, dan menghubungkan data laboratorium dengan keadaan lapangan. Data sifat material tidak selalu bersifat mutlak, sebab nilai yang tercantum dalam tabel biasanya diperoleh dari spesimen standar pada kondisi pengujian tertentu. Komponen nyata sering mengalami permukaan kasar, cacat proses, variasi suhu, beban berulang, korosi, aus, atau benturan. Oleh karena itu, data material harus digunakan dengan penilaian teknik yang hati-hati.

Dalam desain, hubungan antara material dan bentuk komponen sangat erat. Material dengan kekuatan tinggi dapat gagal jika bentuk komponen menimbulkan konsentrasi tegangan. Sebaliknya, material yang tidak terlalu kuat dapat bekerja baik jika geometri, proses, dan kondisi operasinya dirancang dengan tepat. (Budynas dan Sadegh, 2020) menekankan pentingnya analisis tegangan dan regangan untuk memahami perilaku komponen teknik. Pernyataan ini menunjukkan bahwa material tidak berdiri sendiri; sifat material harus dibaca bersama geometri, beban, sambungan, kondisi permukaan, dan lingkungan kerja.

Pengantar material teknik pada akhirnya bertujuan membentuk cara berpikir. Mahasiswa teknik tidak hanya menghafal jenis bahan, tetapi belajar bertanya: struktur apa yang dimiliki material ini, proses apa yang membentuk struktur tersebut, sifat apa yang muncul, bagaimana sifat itu diuji, dan apakah material tersebut cocok untuk aplikasi tertentu. Pola hubungan struktur-proses-sifat-kinerja inilah yang menjadi kerangka utama ilmu material modern.

1.2 Struktur, Ikatan Atom, dan Mikrostruktur Material

Struktur material dimulai dari atom. Atom-atom tersusun melalui ikatan kimia yang menentukan banyak sifat dasar material, seperti titik leleh, kekakuan, konduktivitas, kelarutan, dan kecenderungan bereaksi dengan lingkungan. Ikatan logam memungkinkan elektron valensi bergerak relatif bebas sehingga logam umumnya menghantarkan listrik dan panas dengan baik, dapat ditempa, serta ulet. Ikatan ionik dan kovalen yang kuat pada banyak keramik menyebabkan kekerasan dan titik leleh tinggi, tetapi juga membuatnya cenderung rapuh. Pada polimer, ikatan kovalen kuat terdapat sepanjang rantai utama, sedangkan gaya antarrantai yang lebih lemah mempengaruhi kelenturan, suhu transisi, dan kemampuan diproses.

Susunan atom dapat bersifat kristalin atau *amorf*. Material kristalin memiliki pola susunan atom yang berulang dan teratur, sedangkan material *amorf* tidak memiliki keteraturan jangka panjang. Banyak logam dan keramik bersifat kristalin, sementara kaca dan sebagian polimer memiliki karakter *amorf*. Struktur kristal menentukan bidang dan arah atomik tempat deformasi plastis dapat berlangsung. Pada logam, deformasi plastis terutama terjadi melalui pergerakan dislokasi. Karena itu, hambatan terhadap

dislokasi, seperti batas butir, atom paduan, presipitat, atau pengerjaan dingin, dapat meningkatkan kekuatan material.

Mikrostruktur adalah jembatan antara dunia atomik dan sifat makroskopik. Mikrostruktur meliputi ukuran butir, bentuk butir, distribusi fasa, porositas, inklusi, retak mikro, orientasi serat, dan morfologi partikel. Dua material dengan komposisi sama dapat memiliki sifat berbeda karena mikrostrukturnya berbeda. Pada baja, pendinginan lambat dapat menghasilkan struktur yang relatif lunak, sedangkan pendinginan cepat dapat menghasilkan martensit yang sangat keras. Pada keramik, pori kecil dapat menjadi titik awal retak. Pada komposit, orientasi serat menentukan arah kekuatan terbesar.

Cacat kristal bukan selalu berarti buruk. Dalam ilmu material, cacat adalah penyimpangan dari susunan ideal atom. Cacat titik, seperti vakansi dan atom *interstisial*, mempengaruhi difusi. Cacat garis, yaitu *dislokasi*, sangat penting dalam deformasi plastis logam. Cacat bidang, seperti batas butir, memengaruhi kekuatan, ketahanan korosi, dan perilaku retak. Cacat volume, seperti pori atau *inklusi,* sering menurunkan kekuatan karena menjadi konsentrator tegangan. Dengan mengendalikan cacat, insinyur dapat memperkuat atau menyesuaikan sifat material.

Proses manufaktur sangat menentukan mikrostruktur. Pengecoran menghasilkan pembekuan dari cair ke padat, sehingga ukuran butir, segregasi, dan porositas harus dikendalikan. Pembentukan plastis seperti *rolling, forging*, dan *extrusion* mengubah bentuk butir serta meningkatkan kerapatan dislokasi. Perlakuan panas mengatur transformasi fasa, presipitasi, pelunakan, atau pengerasan. Proses *sintering* pada keramik dan metalurgi serbuk mengubah partikel menjadi benda padat melalui pemanasan di bawah titik leleh utama. Pada polimer, pendinginan, orientasi rantai, dan derajat kristalinitas sangat memengaruhi sifat akhir.

Hubungan mikrostruktur dan sifat dapat dijelaskan melalui contoh sederhana berupa: ukuran butir, Material logam berbutir halus umumnya memiliki kekuatan luluh lebih tinggi karena batas butir menghambat pergerakan dislokasi. Akan tetapi, butir terlalu halus atau proses penguatan tertentu dapat menurunkan keuletan. Artinya, rekayasa material selalu melibatkan kompromi. Peningkatan kekuatan tidak boleh mengabaikan ketangguhan, kemudahan las, ketahanan korosi, atau biaya produksi. Inilah alasan ilmu material membutuhkan pemahaman menyeluruh, bukan sekadar pencarian nilai kekuatan tertinggi.

Pada perkembangan modern, struktur material tidak hanya diamati melalui mikroskop optik, tetapi juga melalui teknik yang jauh lebih maju seperti scanning electron microscopy, transmission *electron microscopy*, *difraksi sinar-X*, *spektroskopi, nanoindentasi*, dan pencitraan berbasis komputer. Data struktur dapat digabungkan dengan simulasi dan kecerdasan buatan untuk mempercepat penemuan material. (DeCost *et al*, 2020) menjelaskan bahwa pendekatan scientific AI dapat membantu mempercepat riset material melalui representasi data, infrastruktur, dan model yang lebih terukur. Kutipan tidak langsung ini memperlihatkan bahwa pemahaman struktur kini tidak hanya bersifat eksperimental, tetapi juga digital dan prediktif.

Namun, pendekatan digital tidak menggantikan dasar-dasar material. Model komputasi tetap membutuhkan pemahaman fisik tentang ikatan atom, fasa, difusi, deformasi, dan kegagalan. Tanpa landasan tersebut, data dapat disalahartikan. Misalnya, model dapat memprediksi kekuatan tinggi, tetapi material mungkin sulit diproduksi, mahal, tidak stabil pada suhu kerja, atau rentan korosi. Karena itu, struktur material harus dilihat sebagai konsep inti yang menghubungkan teori, eksperimen, manufaktur, dan aplikasi.

Bagi mahasiswa teknik, bagian terpenting dari topik struktur adalah kemampuan membaca akibat dari proses. Bila suatu komponen gagal, pemeriksaan patahan, ukuran butir, porositas, atau fasa dapat memberi petunjuk apakah kegagalan berasal dari desain, bahan, proses, atau kondisi kerja. Dengan demikian, struktur material bukan hanya topik mikroskopis, melainkan alat diagnosis teknik yang sangat praktis.

1.3 Klasifikasi Material Teknik

Material teknik umumnya diklasifikasikan menjadi logam, keramik, polimer, komposit, dan material maju. Klasifikasi ini membantu manusia dalam mengenali kecenderungan sifat, proses produksi, serta aplikasi awal. Meskipun demikian, batas antarkelompok tidak selalu kaku. Banyak produk modern menggunakan gabungan beberapa material, misalnya mobil yang memakai baja, aluminium, plastik, karet, kaca, komposit, dan material elektronik dalam satu sistem. Karena itu, klasifikasi harus dipahami sebagai peta awal, bukan sebagai batas mutlak.

Logam dan paduan logam merupakan material yang sangat penting dalam teknik karena memiliki kombinasi kekuatan, keuletan, ketangguhan, konduktivitas, dan kemudahan dibentuk. Contohnya adalah baja, besi tuang, aluminium, tembaga, magnesium, titanium, nikel, dan paduannya. Baja digunakan luas karena kuat, relatif murah, mudah diproduksi, dan sifatnya dapat diatur melalui komposisi serta perlakuan panas. Aluminium dipilih ketika massa ringan dan ketahanan korosi diperlukan. Tembaga unggul dalam konduktivitas listrik, sedangkan titanium banyak digunakan pada aplikasi yang memerlukan rasio kekuatan terhadap berat dan ketahanan korosi tinggi.

Keramik mencakup *oksida, karbida, nitrida*, kaca, semen, refraktori, dan keramik teknik. Sifat khas keramik adalah keras, tahan suhu tinggi, tahan aus, dan tahan korosi, tetapi sering rapuh. Contohnya *alumina, silikon karbida, silikon nitrida, zirkonia*, kaca *borosilikat,* dan porselen. Keramik digunakan pada alat potong, isolator listrik, pelapis tahan panas, komponen biomedis, bahan bangunan, dan komponen elektronik. Kelemahan utamanya adalah sensitivitas terhadap retak, sehingga desain keramik harus menghindari tegangan tarik berlebih dan cacat permukaan.

Polimer adalah material berbasis molekul rantai panjang. Polimer dapat berupa termoplastik, termoset, dan elastomer. Termoplastik seperti *polietilena, polipropilena, polistirena*, dan nilon dapat dilelehkan ulang sehingga cocok untuk proses *injeksi, ekstrusi*, dan pencetakan ulang. Termoset seperti epoksi dan fenolik membentuk jaringan silang permanen setelah pengerasan, sehingga lebih tahan panas tetapi tidak dapat dilelehkan kembali. Elastomer seperti kar*et al*am dan silikon memiliki elastisitas tinggi. Keunggulan polimer adalah ringan, mudah dibentuk, tahan korosi, dan relatif murah; kelemahannya adalah kekakuan dan ketahanan suhu yang umumnya lebih rendah daripada logam atau keramik.

Komposit adalah gabungan dua atau lebih material yang dirancang untuk memperoleh sifat gabungan yang lebih baik. Komposit biasanya terdiri atas matriks dan penguat. Matriks dapat berupa polimer, logam, atau keramik; penguat dapat berupa serat, partikel, atau lapisan. Contoh komposit adalah fiberglass, carbon *fiber reinforced polymer*, beton bertulang, kayu lapis, dan cermet. Keunggulan komposit terletak pada kemampuan menyesuaikan sifat melalui orientasi serat, fraksi volume, jenis matriks, dan metode pembuatan. Namun, komposit juga menuntut kontrol proses yang ketat karena delaminasi, void, dan ikatan antarmuka yang buruk dapat menurunkan performa.

Material maju mencakup semikonduktor, biomaterial, nanomaterial, material cerdas, superkonduktor, material energi, dan material untuk manufaktur aditif. Material ini sering memiliki fungsi khusus, bukan hanya kekuatan mekanik. Semikonduktor dipilih karena sifat listriknya dapat dikendalikan. Biomaterial harus kompatibel dengan tubuh. Material cerdas dapat merespons perubahan suhu, medan listrik, cahaya, atau tegangan. Nanomaterial menunjukkan sifat unik karena ukuran partikelnya sangat kecil. (Choudhary *et al*., 2021) menunjukkan bahwa pembelajaran mendalam semakin banyak digunakan untuk menganalisis data atomistik, citra, spektrum, dan teks dalam riset material. Hal ini menguatkan bahwa klasifikasi material kini juga mencakup cara material dirancang dan ditemukan melalui data.

Perbandingan antar material dapat dilihat pada tabel ringkas berikut. Tabel ini bukan daftar mutlak, tetapi membantu memahami kecenderungan umum setiap kelompok material.

Tabel 1. 1 Pengelompokan Sifat Material dan Karakteristiknya

Kelompok material	Sifat dominan	Kelebihan	Keterbatasan
Logam	Kuat, ulet, konduktif	Mudah dibentuk dan disambung	Korosi dan massa jenis relatif tinggi
Keramik	Keras, tahan panas, tahan aus	Stabil pada lingkungan berat	Rapuh dan sulit diproses
Polimer	Ringan, tahan korosi, mudah dicetak	Biaya proses relatif rendah	Kurang tahan suhu tinggi

Komposit	Sifat dapat dirancang	Rasio kekuatan terhadap berat tinggi	Biaya dan kontrol proses lebih rumit
Material maju	Fungsi khusus	Mendukung teknologi elektronik, energi, dan medis	Mahal dan sering membutuhkan proses presisi

Dari tabel tersebut terlihat bahwa setiap kelompok material memiliki keunggulan dan keterbatasan. Logam baik untuk struktur yang memerlukan ketangguhan dan kemampuan deformasi. Keramik unggul pada suhu tinggi dan keausan, tetapi desainnya harus mempertimbangkan kerapuhan. Polimer unggul dalam bobot ringan dan kemudahan proses, tetapi harus dijaga dari suhu tinggi dan degradasi. Komposit dapat memberikan kombinasi sifat yang sangat baik, tetapi biaya dan kontrol prosesnya dapat menjadi tantangan.

Dalam praktik, klasifikasi material selalu dihubungkan dengan standar. Misalnya, baja dinyatakan dalam standar AISI, ASTM, JIS, atau SNI; aluminium dalam seri paduan; polimer dengan kode resin; dan komposit dengan spesifikasi serat serta matriks. Standar membantu memastikan bahwa material yang dipilih memiliki komposisi, sifat, dan metode pengujian yang konsisten. Tanpa standar, komunikasi antara perancang, pemasok, pabrik, dan pengguna akan mudah menimbulkan kesalahan.

1.4 Sifat Material dan Hubungannya dengan Kinerja

Sifat material adalah respons material terhadap rangsangan dari luar, seperti gaya, panas, listrik, cahaya, medan magnet, atau lingkungan kimia. Sifat mekanik meliputi kekuatan, kekakuan, keuletan, ketangguhan, kekerasan, kelelahan, rayapan, dan ketahanan aus. Sifat fisik mencakup massa jenis, titik leleh, konduktivitas termal, kapasitas panas, ekspansi termal, konduktivitas listrik, dan sifat magnetik. Sifat kimia berkaitan dengan ketahanan korosi, oksidasi, reaktivitas, dan stabilitas lingkungan. Sifat teknologi mencakup kemampuan dibentuk, dicor, dilas, dimesin, dicetak, dan didaur ulang.

Sifat mekanik paling sering dibahas karena banyak komponen teknik bekerja menahan beban. Pada uji tarik, spesimen diberi beban hingga berubah bentuk dan akhirnya patah. Dari uji ini diperoleh modulus elastisitas, batas proporsional, kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum, regangan, dan reduksi luas penampang. Modulus elastisitas menunjukkan kekakuan, yaitu kemampuan menahan *deformasi elastis*. Kekuatan luluh menunjukkan awal deformasi plastis yang permanen. Kekuatan tarik maksimum menunjukkan tegangan tertinggi yang dapat ditahan sebelum penampang mengalami penyempitan lokal. Regangan patah menunjukkan keuletan.

Kekakuan dan kekuatan sering disalahpahami sebagai hal yang sama. Kekakuan berkaitan dengan besar deformasi elastis saat diberi beban, sedangkan kekuatan berkaitan dengan kemampuan menahan tegangan sebelum terjadi luluh atau patah. Karet dapat sangat elastis tetapi tidak kuat. Baja dapat kuat dan cukup kaku. Keramik dapat sangat kaku dan kuat dalam tekan, tetapi lemah terhadap tarik jika ada retak kecil. Perbedaan ini penting karena desain poros, rangka,

pegas, bantalan, dan panel memerlukan kriteria yang tidak selalu sama.

Keuletan adalah kemampuan material mengalami deformasi plastis sebelum patah. Material ulet memberi peringatan sebelum gagal karena mengalami perubahan bentuk yang tampak. Material rapuh dapat patah tiba-tiba tanpa deformasi besar. Ketangguhan adalah kemampuan menyerap energi sebelum patah, sehingga material yang tangguh biasanya memerlukan kombinasi kekuatan dan keuletan. Kekerasan menunjukkan ketahanan terhadap penetrasi, goresan, atau deformasi lokal. Walaupun sering berkorelasi dengan kekuatan, kekerasan tidak boleh digunakan sebagai satu-satunya indikator performa.

Kelelahan terjadi ketika material mengalami beban berulang, meskipun tegangan maksimum lebih rendah daripada kekuatan tariknya. Retak lelah dapat mulai dari permukaan kasar, takikan, pori, inklusi, atau daerah konsentrasi tegangan. Banyak poros, pegas, roda gigi, dan sayap pesawat dirancang dengan mempertimbangkan kelelahan. Rayapan terjadi ketika material mengalami deformasi perlahan di bawah beban tetap pada suhu tinggi. Fenomena ini penting pada turbin, boiler, pipa suhu tinggi, dan komponen mesin yang bekerja lama.

Sifat termal juga sangat penting. Material dengan koefisien ekspansi termal tinggi akan berubah dimensi secara signifikan ketika suhu berubah. Jika dua material dengan ekspansi termal berbeda disambung, tegangan termal dapat muncul. Konduktivitas termal tinggi diperlukan pada heat sink, radiator, dan alat penukar panas; sebaliknya konduktivitas rendah dibutuhkan pada isolator panas. Titik leleh dan stabilitas suhu menentukan apakah material dapat digunakan pada lingkungan panas tanpa melunak, teroksidasi, atau mengalami perubahan fasa yang merugikan.

Sifat listrik dan magnetik menentukan penggunaan material pada kabel, sensor, motor, generator, transformator, perangkat elektronik, dan sistem energi. Tembaga dan aluminium digunakan sebagai konduktor karena hambatan listriknya rendah. Keramik dan polimer tertentu digunakan sebagai isolator. Semikonduktor seperti silikon digunakan karena konduktivitasnya dapat diatur melalui doping dan proses fabrikasi. Material magnetik digunakan pada inti transformator, motor listrik, media penyimpanan, dan aktuator. Dengan demikian, kinerja material tidak selalu berkaitan dengan kekuatan mekanik; pada banyak aplikasi, fungsi listrik, magnetik, optik, atau kimia justru lebih penting.

Ketahanan korosi adalah kemampuan material mempertahankan integritasnya ketika bereaksi dengan lingkungan. Korosi dapat menyebabkan penipisan, lubang, retak, kehilangan kekuatan, kebocoran, atau kegagalan mendadak. Baja karbon murah dan kuat, tetapi rentan korosi jika tidak dilindungi. Baja tahan karat memiliki kromium yang membentuk lapisan pasif, tetapi tetap dapat mengalami korosi celah atau pitting pada lingkungan tertentu. Aluminium membentuk lapisan oksida pelindung, namun dapat mengalami korosi galvanik jika bersentuhan dengan logam lain dalam elektrolit. Karena itu, pemilihan material harus mempertimbangkan lingkungan kerja secara rinci.

Kinerja material adalah hasil gabungan dari banyak sifat. Pisau potong membutuhkan kekerasan, ketahanan panas, dan ketahanan aus. Pegas membutuhkan modulus, batas elastis, dan ketahanan lelah. Implan tulang membutuhkan kekuatan, ketahanan korosi, biokompatibilitas, dan permukaan yang sesuai. Kabel listrik membutuhkan konduktivitas, keuletan, dan ketahanan lingkungan. Perbedaan kebutuhan ini menunjukkan bahwa tidak ada material terbaik untuk semua aplikasi; yang ada adalah material paling sesuai untuk tujuan, batasan, dan kondisi tertentu.

1.5 Pemilihan, Pengujian, dan Perkembangan Material Teknik

Pemilihan material adalah proses sistematis untuk menentukan material yang paling sesuai dengan kebutuhan desain. Tahap pertama adalah menerjemahkan fungsi komponen menjadi persyaratan teknis. Misalnya, komponen harus menahan beban tarik, bekerja pada suhu 200 derajat Celsius, tahan air laut, mudah dilas, dan biaya per unit rendah. Tahap kedua adalah menyaring material yang tidak memenuhi syarat minimum. Tahap ketiga adalah membandingkan kandidat berdasarkan indeks kinerja, biaya, ketersediaan, proses produksi, risiko kegagalan, dan keberlanjutan. Tahap keempat adalah validasi melalui pengujian, prototipe, atau pengalaman lapangan.

Pemilihan material selalu melibatkan kompromi. Material yang sangat kuat dapat mahal atau sulit dengan peralatan mesin. Material yang ringan dapat kurang tahan panas. Material tahan korosi dapat sulit dilas. Material yang mudah diproses mungkin tidak cukup kuat untuk beban tinggi. Oleh karena itu, perancang harus menentukan prioritas: apakah yang paling penting adalah kekuatan, berat, biaya, umur pakai, keamanan, estetika, atau kemudahan produksi. Keputusan yang baik bukan hanya mencari nilai sifat tertinggi, melainkan keseimbangan yang paling tepat.

Pengujian material diperlukan untuk memperoleh data yang dapat dipercaya. Uji tarik, uji tekan, uji lentur, uji impak, uji kekerasan, uji kelelahan, uji rayapan, uji aus, dan uji korosi memberikan informasi berbeda. Pengujian harus mengikuti standar agar hasil dapat dibandingkan. Spesimen, kecepatan pembebanan, suhu, kelembapan, kondisi permukaan, serta metode perhitungan harus dikendalikan. Hasil pengujian juga perlu dianalisis secara statistik karena material nyata memiliki variasi akibat proses dan cacat.

Selain uji mekanik, karakterisasi material digunakan untuk mengetahui komposisi, struktur, dan kondisi permukaan. Spektrometri dapat menentukan komposisi unsur. Difraksi sinar-X dapat mengidentifikasi fasa dan struktur kristal. Mikroskop optik dan elektron dapat memperlihatkan ukuran butir, retak, pori, lapisan, atau bentuk patahan. Analisis termal dapat menunjukkan transisi kaca, titik leleh, kristalisasi, atau stabilitas termal. Karakterisasi yang baik membantu menjelaskan mengapa suatu material memiliki sifat tertentu atau mengapa suatu komponen gagal.

Dalam kegagalan teknik, pertanyaan utama bukan hanya material apa yang patah, melainkan mengapa material itu patah. Penyebabnya dapat berupa beban melebihi desain, konsentrasi tegangan, cacat manufaktur, perlakuan panas yang salah, korosi, kelelahan, keausan, suhu tinggi, atau pemilihan material yang tidak sesuai. Analisis kegagalan menggabungkan pemeriksaan visual, fraktografi, pengujian sifat, analisis kimia, dan peninjauan riwayat operasi. Tujuannya bukan sekadar menyalahkan bahan, tetapi mencegah kegagalan berulang melalui perbaikan desain, proses, inspeksi, atau prosedur penggunaan.

Perkembangan material teknik saat ini bergerak ke arah material yang lebih ringan, kuat, tahan lingkungan, hemat energi, dan mudah didaur ulang. Industri transportasi memerlukan material ringan untuk mengurangi konsumsi energi. Industri energi memerlukan material tahan suhu tinggi, korosi, radiasi, atau siklus termal. Industri kesehatan memerlukan biomaterial yang aman bagi tubuh. Industri elektronik memerlukan material berskala mikro dan nano dengan sifat listrik sangat terkendali. Giustino *et al*. (2021) menunjukkan bahwa material kuantum menjadi wilayah interdisipliner yang menghubungkan sains material, fisika benda terkondensasi, rekayasa perangkat, dan informasi kuantum.

Kecerdasan buatan dan data material menjadi bagian penting dari perkembangan tersebut. Basis data material, simulasi atomistik, pembelajaran mesin, dan optimasi komputasional dapat mempercepat pencarian komposisi dan proses baru. Choudhary *et al*. (2021) menyebut aplikasi pembelajaran mendalam dalam sains material sebagai jalur yang menjanjikan untuk penemuan dan desain material masa depan. Dengan pendekatan ini, ribuan kandidat material dapat disaring secara digital sebelum dilakukan eksperimen laboratorium. Namun, validasi eksperimen tetap penting karena model memiliki asumsi dan keterbatasan.

Manufaktur aditif atau pencetakan 3D juga mengubah cara material diproses. Pada proses ini, komponen dibuat lapis demi lapis sehingga geometri kompleks dapat diproduksi lebih mudah. Akan tetapi, sifat material hasil manufaktur aditif sangat dipengaruhi oleh parameter proses, seperti daya laser, kecepatan pemindaian, ukuran serbuk, atmosfer, dan perlakuan panas setelah proses. Porositas, anisotropi, tegangan sisa, dan kekasaran permukaan harus dikendalikan. Ini menunjukkan bahwa proses baru tetap membutuhkan prinsip lama: struktur, proses, sifat, dan kinerja harus dipahami sebagai satu kesatuan.

Keberlanjutan menjadi pertimbangan yang semakin penting. Pemilihan material tidak hanya menilai performa teknis, tetapi juga jejak karbon, penggunaan energi, kelangkaan sumber daya, toksisitas, kemampuan daur ulang, dan umur pakai. Material yang murah pada awal pembelian belum tentu ekonomis jika cepat rusak, sulit didaur ulang, atau memerlukan energi besar selama produksi. Pendekatan daur hidup membantu menilai dampak sejak ekstraksi bahan baku, produksi, penggunaan, pemeliharaan, hingga akhir masa pakai.

Dalam pembelajaran material teknik, penguasaan konsep harus dilatih melalui contoh nyata. Sebagai contoh ketika memilih material untuk rangka sepeda, maka mahasiswa harus membandingkan baja, aluminium, titanium, dan komposit serat karbon berdasarkan berat, kekuatan, kekakuan, biaya, kemudahan sambung, ketahanan lelah, dan kenyamanan. Ketika memilih material untuk pipa air laut, mahasiswa harus mempertimbangkan korosi, tekanan, suhu, sambungan, perawatan, dan biaya. Ketika memilih material untuk roda gigi, mahasiswa harus menilai kekerasan permukaan, ketangguhan inti, ketahanan lelah kontak, pelumasan, dan proses perlakuan panas.

Pemahaman material harus dekat dengan kebutuhan praktik keteknikan. Dalam konteks Indonesia, aspek ketersediaan material, standar nasional, kemampuan pabrikasi atau industri lokal, biaya transportasi, dan kondisi lingkungan tropis menjadi faktor penting , (Syarif dkk, 2024).

Material yang ideal menurut katalog internasional mungkin tidak selalu paling tepat jika sulit diperoleh, tidak tersedia dalam ukuran yang dibutuhkan, atau tidak dapat diproses dengan fasilitas setempat.

Dengan demikian, pengantar material teknik harus menghasilkan kompetensi dasar: mengenali kelompok material, memahami struktur internal, membaca data sifat, memilih metode pengujian, mengaitkan proses dengan sifat, dan membuat keputusan material secara rasional. Kompetensi ini menjadi dasar bagi mata kuliah lanjutan seperti metalurgi, polimer, keramik, komposit, korosi, perlakuan panas, proses manufaktur, desain mesin, dan analisis kegagalan.

Material teknik adalah fondasi penting dalam seluruh kegiatan rekayasa karena setiap produk teknik selalu membutuhkan bahan yang sesuai dengan fungsi dan kondisi kerjanya. Pemahaman material dimulai dari hubungan antara

struktur, proses, sifat, dan kinerja. Struktur atom dan mikrostruktur menjelaskan mengapa material memiliki sifat tertentu. Proses manufaktur mengubah struktur tersebut, sedangkan sifat material menentukan apakah suatu komponen dapat bekerja dengan aman dan efisien.

Klasifikasi material menjadi logam, keramik, polimer, komposit, dan material maju membantu memberikan gambaran awal tentang kecenderungan sifat dan aplikasi. Namun, pemilihan material tidak boleh hanya berdasarkan kelompok umum. Perancang harus memperhatikan komposisi spesifik, standar, proses, kondisi layanan, biaya, dan risiko kegagalan. Sifat mekanik, fisik, kimia, listrik, termal, magnetik, dan teknologi harus dianalisis sesuai kebutuhan aplikasi.

Pengujian dan karakterisasi material memberikan data untuk desain dan evaluasi. uji tarik, kekerasan, impak, aus, dan korosi memiliki tujuan masing-masing. Karakterisasi mikrostruktur dan komposisi membantu menjelaskan hasil pengujian serta mendukung analisis kegagalan. Pada era modern, perkembangan material juga dipengaruhi oleh kecerdasan buatan, data material, manufaktur aditif, material kuantum, nanomaterial, biomaterial, dan tuntutan keberlanjutan.

Kesimpulannya, tidak ada material yang paling baik untuk semua kebutuhan. Material yang tepat adalah material yang memenuhi fungsi, aman, dapat diproses, tersedia, ekonomis, dan berkelanjutan untuk kondisi tertentsu. Untuk itu seorang calon tekhnokrat perlu memiliki kebiasaan berpikir sistematis agar keputusan material tidak didasarkan pada dugaan, melainkan pada data, analisis, standar, dan pemahaman ilmiah.

BAB 2

STRUKTUR ATOM DAN IKATAN KIMIA

Berbagai sifat penting pada material padat dipengaruhi oleh susunan geometris atom-atomnya serta interaksi yang terjadi antar atom maupun molekul penyusunnya. Pada bab ini, sebagai landasan untuk pembahasan berikutnya, akan dibahas beberapa konsep dasar yang sangat penting, meliputi struktur atom, konfigurasi elektron dan tabel periodik, serta berbagai jenis ikatan atom primer maupun sekunder yang berperan dalam menyatukan atom-atom pembentuk padatan. Pembahasan terhadap topik-topik tersebut dilakukan secara ringkas dengan asumsi bahwa pembaca telah memiliki pemahaman awal mengenai sebagian materi yang disampaikan (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

2.1 Struktur Atom

Atom terdiri dari inti kecil yang terdiri dari proton dan neutron, yang dikelilingi oleh elektron yang bergerak di sekitarnya. Baik proton dan elektron memiliki muatan listrik, yang diukur pada magnitudo signifikan $1{,}602 \times 10^{13}$ coulomb; namun, proton menunjukkan muatan positif, berbeda dengan muatan negatif elektron. Dalam konteks ini, neutron dicirikan oleh tidak adanya muatan listrik, menjadikannya netral secara elektrik. Massa partikel

subatomik ini sangat kecil; proton dan neutron memiliki massa yang kira-kira setara, masing-masing sekitar 1,67 × 10^2 kg, sedangkan massa elektron jauh lebih kecil, diukur pada 9,11 × 10^{31} kg (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

Setiap unsur kimia dibedakan berdasarkan jumlah proton yang terdapat di dalam inti atomnya, yang disebut nomor atom (Z). Pada atom yang netral, jumlah proton akan sama dengan jumlah elektronnya. Nilai nomor atom berupa bilangan bulat yang dimulai dari 1 hingga 92, menyebutkan unsur alami yang memiliki nomor atom terbesar.

Massa atom (A) ditentukan oleh total massa proton dan neutron di dalam inti atom. Walaupun jumlah proton pada unsur yang sama selalu tetap, jumlah neutronnya dapat berbeda-beda. Sebagai hasilnya, sebuah unsur dapat memiliki berbagai variasi dari massa atom yang dikenal sebagai isotop. Berat atom dari suatu unsur diperoleh melalui rata-rata massa atom isotop-isotop yang terdapat di alam.

Untuk menyatakan berat atom digunakan satuan massa atom atau atomic mass unit (amu). Skala amu ditetapkan dengan mendefinisikan 1 amu sebagai 1/12 massa atom karbon-12 (^{12}C), yaitu isotop karbon yang paling umum dengan massa atom sebesar 12,00000. Berdasarkan skala tersebut, massa proton dan neutron sedikit lebih besar dari 1 amu (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

Berat atom suatu unsur atau berat molekul suatu senyawa dapat dinyatakan berdasarkan satuan massa atom (amu) per atom (atau molekul) maupun dalam bentuk massa per mol zat.

Dalam satu mol suatu zat terdapat 6,022 × 10^{23} atom atau molekul, yang dikenal sebagai Bilangan Avogadro. Kedua sistem satuan berat atom ini saling berhubungan melalui persamaan :

1 amu/atom (atau molekul) = 1 g/mol.

Sebagai contoh, berat atom besi adalah 55,85 amu per atom atau setara dengan 55,85 g/mol. Dalam beberapa kondisi, penggunaan satuan amu per atom atau molekul lebih praktis, sedangkan dalam kondisi lain satuan gram (atau kilogram) per mol lebih sering digunakan. Dalam buku ini, satuan yang digunakan adalah gram per mol (Chang, R., & Overby, J., 2011).

2.2 Elektron dalam Atom

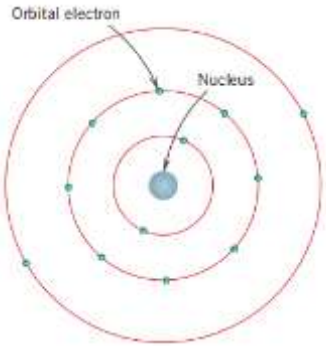
2.2.1 Model Atom

Pada akhir abad ke-19, para ilmuwan menyadari bahwa berbagai fenomena yang berkaitan dengan perilaku elektron dalam material padat tidak dapat dijelaskan secara memadai menggunakan konsep mekanika klasik. Kondisi ini mendorong lahirnya seperangkat teori dan hukum baru yang mengatur perilaku partikel atomik maupun subatomik, yang kemudian dikenal sebagai mekanika kuantum.

Pemahaman mengenai perilaku elektron, baik di dalam atom maupun pada padatan kristalin, sangat berkaitan dengan prinsip-prinsip mekanika kuantum. Akan tetapi, pembahasan secara rinci mengenai teori tersebut berada di luar ruang lingkup buku ini, sehingga hanya dijelaskan secara singkat dan sederhana.

Salah satu kemajuan awal yang signifikan dalam mekanika kuantum adalah kemunculan model atom Bohr. Dalam model ini, elektron dipandang bergerak melingkari inti atom pada jalur-jalur tertentu yang bersifat terpisah atau diskrit. Posisi elektron dapat dijelaskan dengan merujuk pada orbital yang diisinya.

Model atom Bohr biasanya digambarkan melalui gambar berikut.

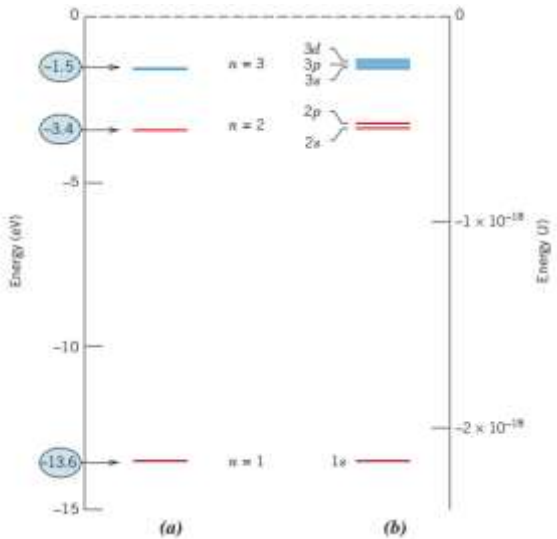


Gambar 2. 1 Model atom Bohr (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Salah satu dasar penting dalam mekanika kuantum mengindikasikan bahwa energi elektron terkuantisasi, yang menunjukkan bahwa elektron hanya dapat memiliki tingkat energi tertentu yang diizinkan. Elektron dapat melakukan perubahan energi, tetapi perubahan ini terjadi melalui lompatan kuantum, yaitu transisi elektron ke tingkat energi yang lebih tinggi dengan menyerap energi, atau ke tingkat energi yang lebih rendah dengan melepaskan energi.

Energi dapat diserap maupun dipancarkan selama proses perpindahan tersebut. Untuk mempermudah pemahaman, energi elektron yang diperbolehkan biasanya dinyatakan dalam bentuk tingkat atau keadaan energi (*energy levels* atau *energy states*). Tingkat-tingkat energi ini tidak berubah secara kontinu, melainkan tersusun secara diskret, sehingga setiap keadaan energi dipisahkan oleh selang energi tertentu. Sebagai ilustrasi, tingkat energi yang diperbolehkan pada atom hidrogen

menurut model atom Bohr ditunjukkan pada Gambar 2.2.

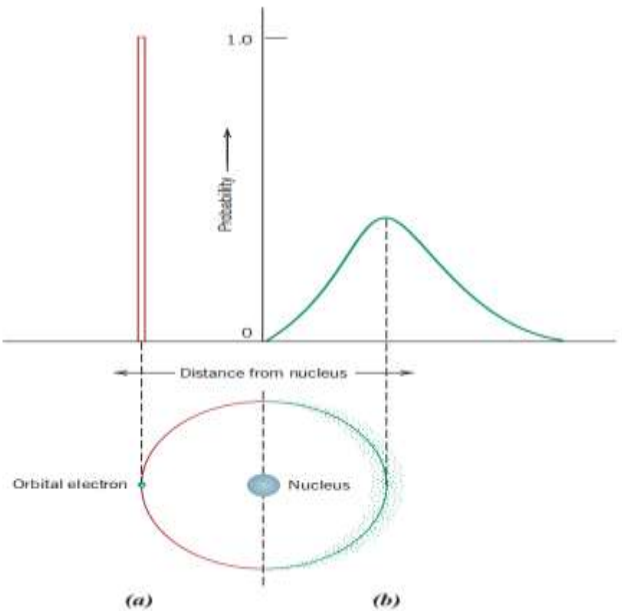


Gambar 2. 2 (a) Tiga Level Energi Awal untuk Elektron Dalam Atom Hidrogen Menurut Model Niels Bohr. (b) Tingkat Energi Elektron untuk Tiga Lapisan Pertama dalam Atom Hidrogen Menurut Model Mekanika Gelombang (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Nilai energi elektron dinyatakan bernilai negatif, dengan tingkat energi nol dijadikan sebagai acuan untuk kondisi elektron bebas atau tidak terikat pada atom. Pada atom hidrogen, satu-satunya elektron yang dimiliki hanya dapat menempati salah satu tingkat energi yang tersedia tersebut.

Dengan demikian, model atom Bohr menjadi salah satu pendekatan awal dalam menjelaskan perilaku elektron di dalam atom, baik berdasarkan posisi elektron pada orbital tertentu maupun berdasarkan tingkat energinya yang bersifat terkuantisasi.

Meskipun demikian, model Bohr memiliki sejumlah keterbatasan penting karena belum mampu menerangkan berbagai fenomena yang berkaitan dengan perilaku elektron secara lebih kompleks. Keterbatasan ini kemudian disempurnakan melalui pengembangan model mekanika gelombang, yang memandang elektron memiliki sifat ganda, yaitu sebagai partikel sekaligus gelombang.



Gambar 2. 3 Perbandingan antara (a) Model Atom Bohr dan (b) Model Atom Mekanika Gelombang dalam Hal Distribusi Elektron (John Wiley & Sons, 1987)

Dalam pendekatan mekanika gelombang, elektron tidak lagi diasumsikan bergerak pada lintasan pasti seperti dalam model Bohr. Posisi elektron dinyatakan dalam bentuk peluang keberadaan pada daerah tertentu di sekitar inti atom. Oleh sebab itu, keberadaan elektron

digambarkan sebagai distribusi probabilitas atau dikenal sebagai awan elektron (*electron cloud*) (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

Gambar 2.3 biasanya digunakan untuk menampilkan perbandingan antara model atom Bohr dan model mekanika gelombang dari atom hidrogen. Kedua metode tersebut tetap digunakan dalam diskusi buku ini, dengan pemilihan model yang disesuaikan agar memberikan penjelasan yang paling jelas serta lebih mudah dimengerti.

2.2.2 Bilangan Kuantum

Dalam kajian mekanika gelombang, setiap elektron yang terdapat dalam atom dijelaskan dengan menggunakan empat parameter yang dikenal sebagai bilangan kuantum .Tiga dari bilangan kuantum tersebut berfungsi untuk menentukan dimensi, bentuk, dan orientasi ruang dari distribusi probabilitas lokasi elektron .Di samping itu, dalam model Bohr, tingkat energi dibagi menjadi beberapa subkulit elektron, di mana jumlah keadaan energi untuk setiap subkulit ditentukan oleh bilangan kuantum tersebut.

Kulit elektron (*shell*) dinyatakan melalui bilangan kuantum utama, yaitu n, yang bernilai bilangan bulat mulai dari 1. Dalam beberapa literatur, kulit elektron juga dilambangkan dengan huruf K, L, M, N, O, dan seterusnya, yang secara berurutan mewakili n = 1, 2, 3, 4, 5, dan seterusnya. Bilangan kuantum utama ini juga berkaitan dengan model Bohr, terutama dalam menggambarkan jarak atau kedudukan elektron terhadap inti atom (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

Tabel 2. 1 Jumlah Elektron di Beberapa Kulit dan Subkulit

Bilangan Kuantum	Kulit	Subkulit	Jumlah	Jumlah Elektron Subkulit	Jumlah Elektron Kulit
1	K	s	1	2	2
2	L	s	1	2	8
		p	3	6	
3	M	s	1	2	18
		p	3	6	
		d	5	10	
4	N	s	1	2	32
		p	3	6	
		d	5	10	
		f	7	14	

Bilangan kuantum kedua, yaitu l, digunakan untuk menyatakan subkulit elektron yang dilambangkan dengan huruf s, p, d, dan f, di mana masing-masing menunjukkan bentuk orbital elektron. Jumlah subkulit yang dapat dimiliki suatu atom bergantung pada nilai bilangan kuantum utama (n), sehingga subkulit yang diperbolehkan untuk setiap nilai n mengikuti aturan tertentu.

Bilangan kuantum ketiga, yaitu m_l, menentukan banyaknya keadaan energi yang terdapat pada setiap subkulit. Subkulit s hanya memiliki satu keadaan energi, sedangkan subkulit p, d, dan f masing-masing mempunyai tiga, lima, dan tujuh keadaan energi. Pada

kondisi tanpa pengaruh medan magnet luar, seluruh keadaan dalam satu subkulit memiliki energi yang sama atau bersifat degenerat. Akan tetapi, apabila atom dikenai medan magnet eksternal, tingkat energi tersebut akan mengalami pemisahan (splitting) sehingga setiap keadaan memiliki energi yang sedikit berbeda. Selain itu, setiap elektron mempunyai momen spin yang dapat berorientasi ke arah atas ataupun bawah. Karakteristik ini dinyatakan oleh bilangan kuantum keempat, yaitu m_s, yang memiliki dua nilai kemungkinan, yakni +1/2 dan −1/2, sebagai representasi dari arah spin elektron tersebut.

Dengan keberadaan mekanika gelombang, model Bohr kemudian ditingkatkan melalui penambahan tiga angka kuantum baru yang menghasilkan ide mengenai subkulit elektron di dalam setiap lapisan atom .Perbandingan antara model Bohr dan model mekanika gelombang, terutama dalam konteks atom hidrogen, biasanya disajikan dalam bentuk skema tingkat energi.

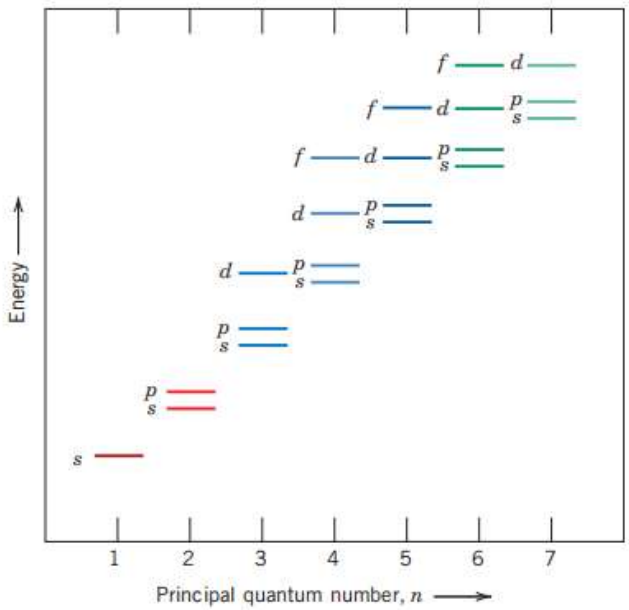
Skema tingkat energi yang komprehensif untuk berbagai lapisan dan subkulit berdasarkan pendekatan mekanika gelombang menunjukkan beberapa karakteristik penting .Pertama, semakin rendah angka kuantum utama (n) yang diterapkan, semakin rendah pula tingkat energinya; sebagai contoh, energi orbital 1s lebih rendah dibandingkan dengan 2s, sedangkan 2s lebih rendah daripada 3s .Kedua, dalam satu lapisan yang sama, energi subkulit akan meningkat sejalan dengan bertambahnya angka kuantum l; misalnya, energi orbital 3d lebih tinggi dibandingkan dengan 3p, dan 3p lebih tinggi daripada 3s.

Selain itu, ada kemungkinan terjadinya tumpang tindih energi antara keadaan dalam satu lapisan dengan kondisi pada lapisan terdekat, terutama pada subkulit d dan f .Sebagai contoh, tingkat energi orbital 3d umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan orbital 4s (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

2.2.3 Konfigurasi Elektron

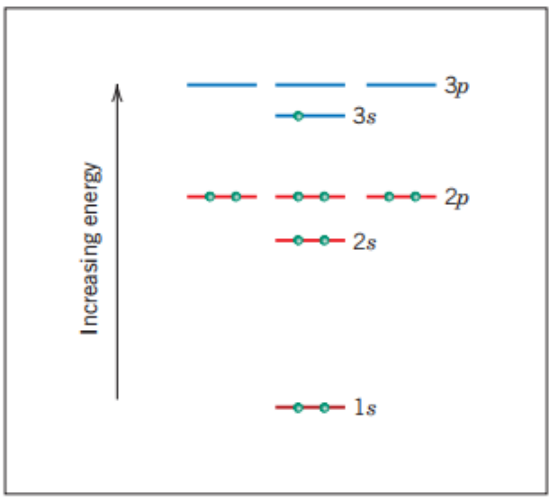
Pembahasan sebelumnya berfokus pada kondisi elektron, khususnya tingkat energi yang dapat ditempati oleh elektron. Untuk memahami cara elektron mengisi tingkat-tingkat energi tersebut, digunakan prinsip larangan Pauli (*Pauli exclusion principle*) sebagai salah satu konsep dasar dalam mekanika kuantum. Prinsip ini menyatakan bahwa satu keadaan elektron hanya dapat diisi oleh maksimum dua elektron yang memiliki arah spin berlawanan.

Berdasarkan prinsip tersebut, subkulit s, p, d, dan f masing-masing memiliki kapasitas maksimum sebanyak 2, 6, 10, dan 14 elektron. Jumlah maksimum elektron yang dapat mengisi setiap kulit elektron biasanya disajikan dalam suatu tabel, misalnya pada Tabel 2.1.



Gambar 2. 4 Ilustrasi Skematik Energi Relatif Elektron (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Tidak semua keadaan yang ada di dalam atom diisi oleh elektron .Dalam kebanyakan atom, elektron cenderung mengisi tingkat energi paling rendah terlebih dahulu di dalam kulit dan subkulit elektron, dengan maksimum dua elektron (yang memiliki spin berlawanan) pada setiap keadaan .Struktur energi untuk atom natrium umumnya digambarkan secara diagramatik pada diagram tingkat energi yang terlihat di Gambar berikut.



Gambar 2. 5 Ilustrasi Skematis Keadaan Energi Pada Atom Natrium (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Apabila seluruh elektron menempati tingkat energi paling rendah sesuai aturan yang berlaku, maka atom berada pada kondisi yang disebut keadaan dasar (*ground state*). Akan tetapi, elektron juga dapat berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi melalui proses transisi energi.

Konfigurasi atau struktur elektron suatu atom menunjukkan distribusi elektron pada keadaan-keadaan energi yang tersedia. Dalam penulisan konvensional, jumlah elektron pada masing-masing subkulit dinyatakan dalam bentuk superskrip setelah simbol kulit dan subkulitnya. Sebagai contoh, konfigurasi elektron untuk atom hidrogen, helium, dan natrium adalah sebagai berikut:

- Hidrogen: $1s^1$
- Helium: $1s^2$

• Natrium: $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^1$

Konfigurasi elektron unsur-unsur lainnya umumnya dapat dilihat pada tabel periodik maupun tabel konfigurasi elektron.

Beberapa hal penting perlu dijelaskan terkait konfigurasi elektron. Elektron valensi merupakan elektron yang berada pada kulit paling luar atom. Hal ini memiliki peranan penting karena terlibat langsung dalam pembentukan ikatan antaratom, baik untuk membentuk molekul maupun struktur padatan. Selain itu, berbagai sifat fisik dan kimia suatu material sangat dipengaruhi oleh keberadaan elektron valensi tersebut.

Selanjutnya, terdapat atom-atom yang memiliki konfigurasi elektron stabil, yaitu ketika subkulit pada kulit terluarnya terisi penuh. Pada umumnya, kondisi stabil dicapai apabila subkulit s dan p pada kulit terluar berisi delapan elektron, hal ini seperti yang terdapat pada unsur neon, argon, dan kripton. Helium menjadi pengecualian karena kestabilannya telah tercapai hanya dengan dua elektron pada subkulit 1s. Unsur-unsur dengan konfigurasi demikian dikenal sebagai gas mulia (*noble gases*) yang bersifat sangat inert atau sukar bereaksi secara kimia.

Sebaliknya, atom unsur lain yang belum memiliki kulit valensi penuh cenderung berusaha mencapai konfigurasi stabil dengan cara menerima atau melepaskan elektron sehingga membentuk ion bermuatan.

Dalam keadaan tertentu, orbital s dan p dapat berkolaborasi membentuk orbital campuran (*hybrid orbitals*) bertipe sp^n, di mana n menunjukkan banyaknya orbital p yang terlibat, yang dapat bernilai 1, 2, atau 3 .Unsur-unsur yang tergolong dalam kelompok IIIA, IVA, dan VA pada tabel periodik merupakan unsur-unsur

yang biasanya mengalami pembentukan orbital campuran tersebut.

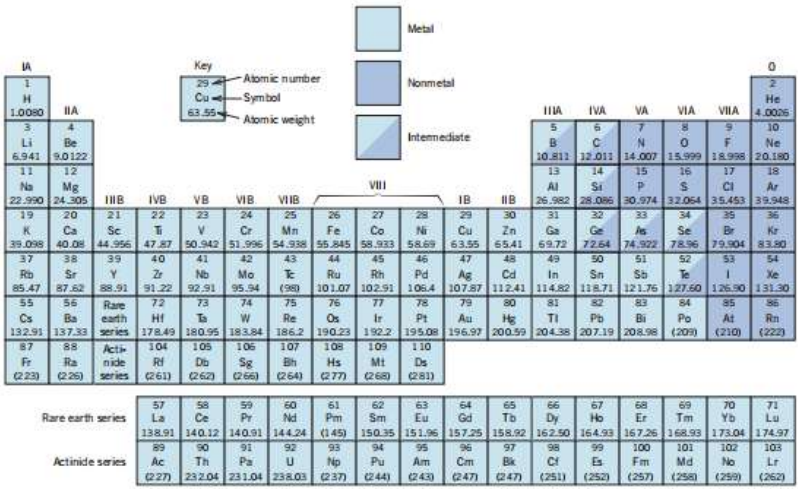
Pembentukan orbital hibrida terjadi karena konfigurasi tersebut menghasilkan tingkat energi yang lebih rendah bagi elektron valensi. Pada atom karbon, hibridisasi sp^3 memiliki peranan penting dalam kimia organik dan polimer. Orbital hibrida sp^3 menghasilkan sudut ikatan sekitar 109,5° dengan geometri tetrahedral, yang banyak ditemukan pada struktur rantai polimer (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

2.3 Tabel Periodik

Periodic Table atau tabel periodik merupakan susunan unsur-unsur kimia yang diatur berdasarkan nomor atom, konfigurasi elektron, dan sifat kimianya. Tabel ini pertama kali dikembangkan oleh Dmitri Mendeleev pada tahun 1869 untuk mempermudah pengelompokan unsur yang memiliki kemiripan sifat. Dalam tabel periodik, unsur-unsur disusun dalam baris horizontal yang disebut periode dan kolom vertikal yang disebut golongan. Unsur yang berada dalam satu golongan umumnya memiliki sifat kimia yang mirip karena jumlah elektron valensinya sama .

Tabel periodik terdiri atas beberapa jenis unsur, yaitu logam, nonlogam, dan metaloid. Sebagian besar unsur yang berada di sisi kiri dan tengah tabel termasuk logam yang bersifat penghantar listrik dan panas yang baik. Sementara itu, unsur nonlogam berada di sisi kanan dan biasanya memiliki sifat tidak mengilap serta kurang baik menghantarkan listrik. Di antara keduanya terdapat metaloid yang memiliki sifat campuran logam dan nonlogam. Selain itu, tabel periodik juga membantu para ilmuwan memahami hubungan antarunsur, memprediksi sifat unsur baru, serta

digunakan dalam berbagai bidang seperti pendidikan, industri, kesehatan, dan teknologi.

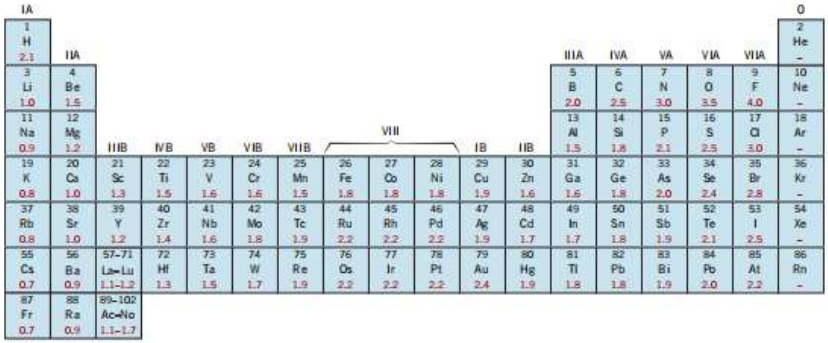


Tabel 2. 2 Periodik Semua Unsur (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Periodic Table merupakan susunan unsur-unsur kimia yang dikelompokkan berdasarkan nomor atom, konfigurasi elektron, dan kemiripan sifat kimia. Dalam tabel periodik terdapat baris mendatar yang disebut periode dan kolom tegak yang disebut golongan. Golongan menunjukkan jumlah elektron valensi suatu unsur sehingga unsur-unsur dalam satu golongan memiliki sifat kimia yang hampir sama. Contohnya, golongan alkali seperti litium dan natrium sangat reaktif terhadap air, sedangkan golongan gas mulia seperti helium dan neon bersifat stabil karena kulit elektronnya sudah penuh. Periode menunjukkan jumlah kulit elektron yang dimiliki suatu unsur. Semakin ke bawah periode, jumlah kulit elektron unsur akan semakin banyak.

Berdasarkan sifatnya, unsur dalam tabel periodik dibedakan menjadi tiga jenis utama, yaitu logam, nonlogam, dan metaloid. Logam umumnya berada di bagian kiri dan tengah tabel periodik, memiliki sifat mengilap, dapat menghantarkan listrik dan panas, serta mudah dibentuk. Nonlogam berada di bagian kanan tabel periodik dan biasanya bersifat rapuh, tidak mengilap, serta kurang baik menghantarkan listrik. Sementara itu, metaloid terletak di antara logam dan nonlogam, memiliki sifat campuran keduanya, misalnya dapat menghantarkan listrik tetapi tidak sebaik logam. Pembagian jenis unsur ini sangat penting dalam memahami sifat fisika dan kimia suatu unsur.

Salah satu sifat penting unsur dalam tabel periodik adalah keelektronegatifan, yaitu kemampuan atom untuk menarik pasangan elektron dalam suatu ikatan kimia. Nilai keelektronegatifan unsur cenderung meningkat dari kiri ke kanan dalam satu periode dan menurun dari atas ke bawah dalam satu golongan. Unsur dengan nilai keelektronegatifan tertinggi adalah fluor karena sangat kuat menarik elektron, sedangkan unsur logam alkali seperti cesium memiliki nilai keelektronegatifan rendah. Perbedaan nilai keelektronegatifan antarunsur menentukan jenis ikatan kimia yang terbentuk, seperti ikatan ion atau ikatan kovalen. Sifat ini sangat penting dalam mempelajari reaksi kimia, pembentukan senyawa, dan kestabilan zat (Chang, R., & Overby, J., 2011).



IA								VIII			IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0
1 H 2.1	IIA																	2 He –
3 Li 1.0	4 Be 1.5												5 B 2.0	6 C 2.5	7 N 3.0	8 O 3.5	9 F 4.0	10 Ne –
11 Na 0.9	12 Mg 1.2	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB					IB	IIB	13 Al 1.5	14 Si 1.8	15 P 2.1	16 S 2.5	17 Cl 3.0	18 Ar –
19 K 0.8	20 Ca 1.0	21 Sc 1.3	22 Ti 1.5	23 V 1.6	24 Cr 1.6	25 Mn 1.5	26 Fe 1.8	27 Co 1.8	28 Ni 1.8	29 Cu 1.9	30 Zn 1.6		31 Ga 1.6	32 Ge 1.8	33 As 2.0	34 Se 2.4	35 Br 2.8	36 Kr –
37 Rb 0.8	38 Sr 1.0	39 Y 1.2	40 Zr 1.4	41 Nb 1.6	42 Mo 1.8	43 Tc 1.9	44 Ru 2.2	45 Rh 2.2	46 Pd 2.2	47 Ag 1.9	48 Cd 1.7		49 In 1.7	50 Sn 1.8	51 Sb 1.9	52 Te 2.1	53 I 2.5	54 Xe –
55 Cs 0.7	56 Ba 0.9	57–71 La–Lu 1.1–1.2	72 Hf 1.3	73 Ta 1.5	74 W 1.7	75 Re 1.9	76 Os 2.2	77 Ir 2.2	78 Pt 2.2	79 Au 2.4	80 Hg 1.9		81 Tl 1.8	82 Pb 1.8	83 Bi 1.9	84 Po 2.0	85 At 2.2	86 Rn –
87 Fr 0.7	88 Ra 0.9	89–102 Ac–No 1.1–1.7																

Tabel 2. 3 Nilai Elektronegativitas Semua Unsur (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

2.4 Elektron Dalam Atom

Pemahaman mengenai berbagai sifat fisik material akan menjadi lebih mendalam apabila didukung oleh pengetahuan tentang gaya antaratom yang mengikat atom-atom penyusunnya. Prinsip dasar ikatan atom dapat dijelaskan melalui interaksi antara dua atom terisolasi yang saling didekatkan dari jarak yang sangat jauh atau mendekati tak hingga.

Pada jarak yang sangat besar, interaksi antaratom dapat dianggap tidak ada karena kedua atom berada terlalu jauh untuk saling mempengaruhi. Akan tetapi, ketika jarak antaratom semakin mendekat, masing-masing atom mulai memberikan gaya terhadap atom lainnya. Gaya tersebut terdiri atas gaya tarik (*attractive force*, FA) dan gaya tolak (*repulsive force*, FR), yang nilainya bergantung pada jarak antaratom (r).

Asal gaya tarik (FA) ditentukan oleh jenis ikatan yang terbentuk di antara kedua atom. Sebaliknya, gaya tolak muncul akibat interaksi antara awan elektron bermuatan negatif dari masing-masing atom, dan pengaruhnya menjadi

semakin besar ketika jarak antaratom sangat kecil sehingga kulit elektron terluar mulai saling bertumpang tindih.

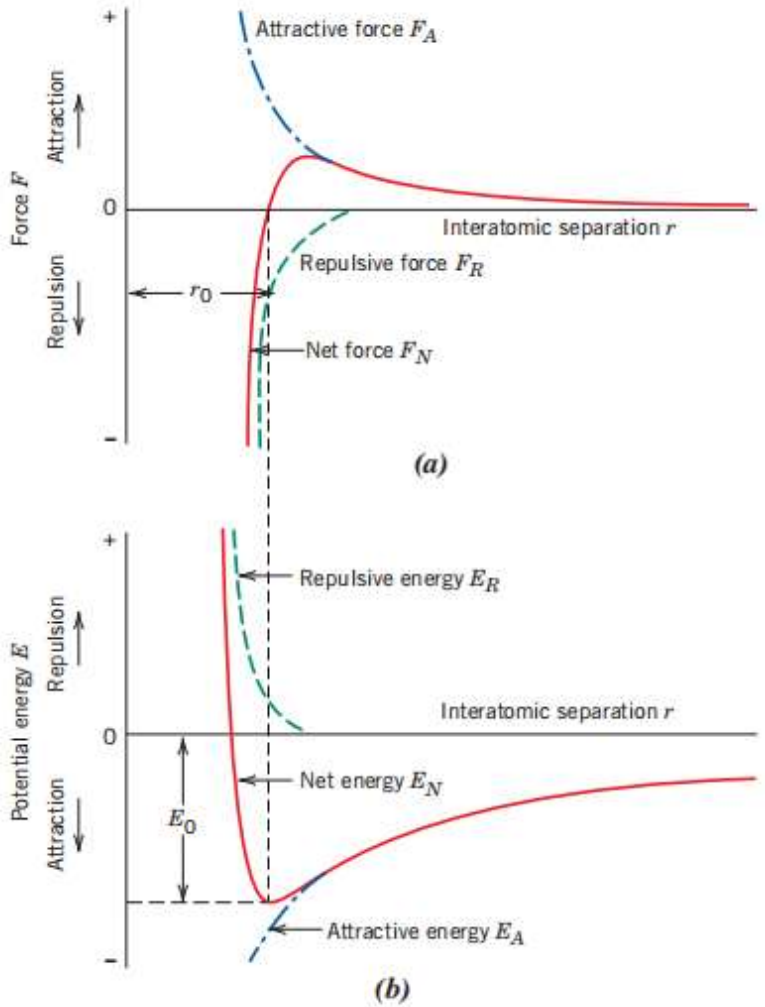
Gaya total (FN) yang bekerja antara dua atom merupakan hasil penjumlahan antara gaya tarik dan gaya tolak tersebut, yang dapat dinyatakan sebagai berikut;

$$FN = FA + FR$$

Gaya total ini juga merupakan fungsi dari jarak antar atom. Ketika gaya tarik dan gaya tolak seimbang (FA + FR = 0), maka tidak terdapat gaya netto, sehingga tercapai kondisi kesetimbangan. Pada kondisi ini, jarak antar inti atom disebut sebagai jarak kesetimbangan (r_0). Untuk banyak atom, nilai r_0 berada pada kisaran sekitar 0,3 nm.

Pada kondisi kesetimbangan ini, apabila kedua atom dijauhkan satu sama lain, gaya tarik akan bekerja untuk menariknya kembali ke posisi semula. Sebaliknya, jika kedua atom dipaksa saling mendekat, gaya tolak akan semakin besar sehingga menghambat pendekatan tersebut.

Dalam banyak pembahasan, analisis energi potensial antaratom sering kali lebih mudah dilakukan dibandingkan analisis gaya secara langsung. Secara matematis, gaya dan energi memiliki hubungan yang erat, di mana energi total (EN), energi tarik (EA), dan energi tolak (ER) semuanya bergantung pada jarak antaratom (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).



Gambar 2. 6 (a) Hubungan Antara Gaya Tolak, Gaya Tarik, Dan Gaya Resultan Terhadap Perubahan Jarak Antaratom Pada Dua Atom Yang Terisolasi. (b) Hubungan Antara Energi Potensial Gaya Tolak, Energi Potensial Gaya Tarik, Dan Energi Total Terhadap Jarak Antaratom Pada Dua Atom Yang Terisolasi (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Kurva hubungan antara energi potensial dan jarak antaratom memperlihatkan bahwa energi total merupakan hasil penjumlahan energi tarik dan energi tolak. Titik terendah pada kurva energi total menunjukkan jarak kesetimbangan atom (r_0). Energi pada titik minimum tersebut dikenal sebagai energi ikatan (E_0), yaitu energi yang dibutuhkan untuk memisahkan dua atom hingga berada pada jarak tak hingga. Walaupun konsep ini dijelaskan menggunakan sistem sederhana yang hanya melibatkan dua atom, prinsip serupa juga berlaku pada material padat dengan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi karena melibatkan banyak atom sekaligus. Setiap atom dalam material memiliki energi ikatan yang setara dengan E_0. Besarnya energi ikatan serta bentuk kurva energi terhadap jarak antaratom berbeda-beda pada setiap material, tergantung pada jenis ikatan atom yang dimilikinya (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

Berbagai sifat material sangat dipengaruhi oleh nilai energi ikatan dan bentuk kurva tersebut. Sebagai contoh, material dengan energi ikatan yang besar umumnya memiliki titik leleh tinggi. Pada suhu kamar, material dengan energi ikatan tinggi cenderung berada dalam fase padat, sedangkan material dengan energi ikatan rendah lebih mudah berada pada fase gas. Material dengan energi ikatan menengah umumnya berada dalam fase cair.

Sifat kekakuan mekanik atau modulus elastisitas material juga dipengaruhi oleh bentuk kurva gaya terhadap jarak antaratom. Material yang bersifat kaku memiliki kemiringan kurva yang tajam di sekitar titik kesetimbangan, sedangkan material yang lebih lentur menunjukkan kemiringan kurva yang lebih landai.

Perubahan dimensi akibat perubahan temperatur, yang dikenal sebagai koefisien muai panjang, juga berkaitan erat dengan bentuk kurva energi antaratom. Material dengan

kurva berbentuk lembah yang sempit dan dalam yang umumnya memiliki energi ikatan besar cenderung mempunyai koefisien muai yang kecil, sehingga perubahan dimensinya akibat kenaikan suhu relatif rendah.

Dalam material padat, terdapat tiga jenis ikatan utama atau ikatan kimia, yaitu ikatan ionik, ikatan kovalen, dan ikatan logam. Ketiga jenis ikatan tersebut melibatkan elektron valensi, sehingga karakteristik ikatan sangat dipengaruhi oleh struktur elektron atom-atom penyusunnya.

Pembentukan ketiga jenis ikatan tersebut terjadi karena mencapai konfigurasi elektron yang stabil, menyerupai konfigurasi gas mulia. Selain ikatan primer tersebut, pada banyak material padat juga terdapat gaya sekunder atau gaya fisik. Walaupun kekuatannya lebih lemah dibandingkan ikatan primer, gaya sekunder tetap memberikan pengaruh terhadap beberapa sifat fisik material (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

2.5 Ikatan Antar Atom

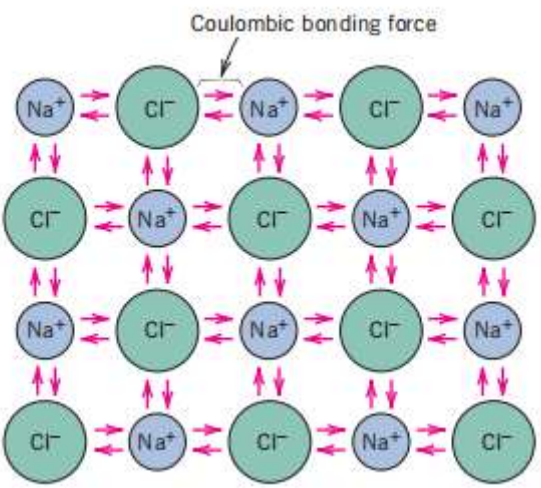
2.5.1 Ikatan Ionik

Ikatan ionik merupakan salah satu jenis ikatan yang paling sederhana untuk dipahami dan divisualisasikan. Ikatan ini umumnya terbentuk pada senyawa yang tersusun dari unsur logam dan nonlogam, yaitu unsur-unsur yang berada di bagian kiri dan kanan tabel periodik.

Atom logam memiliki kecenderungan untuk melepaskan elektron valensinya kepada atom nonlogam. Melalui proses tersebut, masing-masing atom akan mencapai konfigurasi elektron yang stabil menyerupai

gas mulia, sekaligus memperoleh muatan listrik sehingga berubah menjadi ion.

Salah satu contoh material yang memiliki ikatan ionik adalah natrium klorida (NaCl). Atom natrium mencapai konfigurasi elektron stabil seperti neon dengan melepaskan satu elektron valensi dari orbital 3s, sehingga berubah menjadi ion bermuatan positif. Elektron yang dilepaskan tersebut diterima oleh atom klorin, sehingga atom klorin memperoleh konfigurasi elektron menyerupai argon dan membentuk ion bermuatan negatif. Dengan demikian, pada senyawa natrium klorida, atom natrium dan klorin hadir dalam bentuk ion-ion yang saling bermuatan berlawanan (Petrucci, R. H., dkk, 2017).



Gambar 2. 7 Representasi Skematis Ikatan Ionik Dalam Natrium Klorida (NaCl) (Petrucci, R. H., dkk, 2017)

Gaya tarik pada ikatan ionik berasal dari gaya Coulomb, yaitu gaya elektrostatik antara ion bermuatan positif dan ion bermuatan negatif. Adanya perbedaan muatan menyebabkan ion-ion tersebut saling tarik-menarik. Pada dua ion yang terisolasi, energi tarik (EA) bergantung pada jarak antaratom. Di sisi lain, terdapat pula energi tolak yang timbul akibat interaksi antar awan elektron. Dalam persamaan energi ikatan tersebut terdapat konstanta A, B, dan n yang nilainya ditentukan oleh sistem ionik terkait, dengan nilai n umumnya mendekati 8.

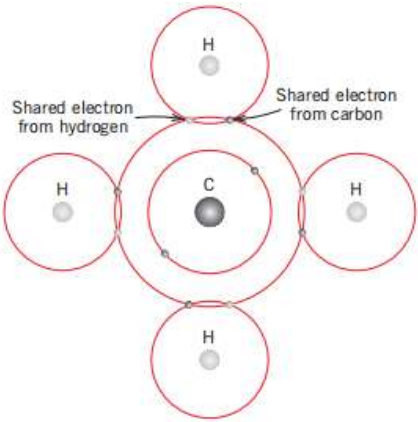
Ikatan ionik bersifat tidak terarah (*nondirectional*), yang berarti kekuatan ikatan memiliki nilai yang sama ke segala arah di sekitar ion. Oleh sebab itu, agar tercapai kestabilan, setiap ion positif harus dikelilingi oleh ion negatif dalam susunan tiga dimensi, demikian pula sebaliknya.

Ikatan ionik merupakan jenis ikatan utama yang banyak ditemukan pada material keramik. Susunan ion dalam material keramik akan dibahas lebih lanjut pada pembahasan berikutnya. Energi ikatan pada material ionik tergolong tinggi, biasanya berada pada kisaran 600–1500 kJ/mol atau sekitar 3–8 eV per atom, yang ditunjukkan oleh tingginya titik leleh material tersebut. Material dengan ikatan ionik umumnya memiliki sifat keras, rapuh (getas), serta bersifat isolator terhadap panas dan listrik (Petrucci, R. H., dkk, 2017).

2.5.2 Ikatan Kovalen

Pada ikatan kovalen, kestabilan konfigurasi elektron dicapai melalui penggunaan bersama elektron oleh atom-atom yang saling berdekatan. Dalam ikatan ini, masing-masing atom menyumbangkan sedikitnya satu elektron untuk membentuk pasangan elektron bersama, sehingga elektron tersebut dianggap dimiliki secara bersama oleh kedua atom yang berikatan.

Salah satu contoh ikatan kovalen dapat dilihat pada molekul metana (CH_4). Atom karbon memiliki empat elektron valensi, sedangkan setiap atom hidrogen memiliki satu elektron valensi. Melalui pemakaian bersama elektron dengan atom karbon, masing-masing atom hidrogen dapat mencapai konfigurasi elektron menyerupai helium, yaitu memiliki dua elektron pada orbital 1s. Pada saat yang sama, atom karbon memperoleh empat elektron tambahan hasil pemakaian bersama dengan empat atom hidrogen, sehingga jumlah elektron valensinya menjadi delapan dan menyerupai konfigurasi elektron neon.



Gambar 2. 8 Gambaran Skematis Ikatan Kovalen Metana (Petrucci, R. H., dkk, 2017)

Ikatan kovalen bersifat terarah (*directional*), yang berarti ikatan hanya terbentuk antara atom-atom tertentu dengan orientasi tertentu sesuai posisi atom yang saling berbagi elektron. Berbagai molekul unsur nonlogam, seperti H_2, Cl_2, dan F_2, maupun molekul yang tersusun dari unsur berbeda seperti CH_4, H_2O, HNO_3, dan HF, terbentuk melalui ikatan kovalen. Ikatan jenis ini juga dijumpai pada material padat seperti berlian (karbon), silikon, dan germanium, serta pada senyawa padat seperti gallium arsenida (GaAs), indium antimonida (InSb), dan silikon karbida (SiC), yang umumnya berasal dari unsur-unsur di bagian kanan tabel periodik.

Jumlah ikatan kovalen yang mampu dibentuk oleh suatu atom ditentukan oleh jumlah elektron valensi yang dimilikinya. Apabila suatu atom mempunyai N elektron valensi, maka jumlah maksimum ikatan kovalen yang dapat terbentuk adalah (8 − N). Sebagai contoh, atom klorin yang memiliki tujuh elektron valensi hanya dapat

membentuk satu ikatan kovalen, seperti pada molekul Cl_2. Sebaliknya, atom karbon dengan empat elektron valensi dapat membentuk empat ikatan kovalen. Pada struktur berlian, setiap atom karbon terikat secara kovalen dengan empat atom karbon lainnya sehingga membentuk jaringan tiga dimensi yang saling terhubung.

Kekuatan ikatan kovalen dapat berbeda-beda tergantung materialnya. Pada berlian, ikatan kovalen sangat kuat sehingga menghasilkan material dengan titik leleh sangat tinggi, yaitu sekitar 3550°C. Sebaliknya, pada material seperti bismut, ikatan kovalen relatif lebih lemah sehingga titik lelehnya jauh lebih rendah, sekitar 270°C (Petrucci, R. H., dkk, 2017).

Polimer merupakan salah satu contoh material yang didominasi oleh ikatan kovalen. Struktur dasar polimer tersusun atas rantai panjang atom karbon yang saling terhubung melalui ikatan kovalen. Dari empat ikatan yang dimiliki setiap atom karbon, dua digunakan untuk membentuk rantai utama, sedangkan dua ikatan lainnya umumnya berikatan dengan atom atau gugus atom lain. Struktur molekul polimer tersebut akan dibahas lebih rinci pada pembahasan khusus mengenai polimer (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

Pada kenyataannya, ikatan yang benar-benar murni ionik maupun murni kovalen sangat jarang ditemukan. Sebagian besar ikatan memiliki sifat campuran antara karakter ionik dan kovalen. Tingkat keionikan atau kekovalenan suatu ikatan dipengaruhi oleh posisi unsur dalam tabel periodik dan besarnya perbedaan keelektronegatifan antaratom. Semakin besar perbedaan keelektronegatifan dua atom, maka karakter ionik ikatan akan semakin dominan. Sebaliknya, apabila perbedaan keelektronegatifannya kecil, maka ikatan cenderung lebih bersifat kovalen. Persentase sifat ionik

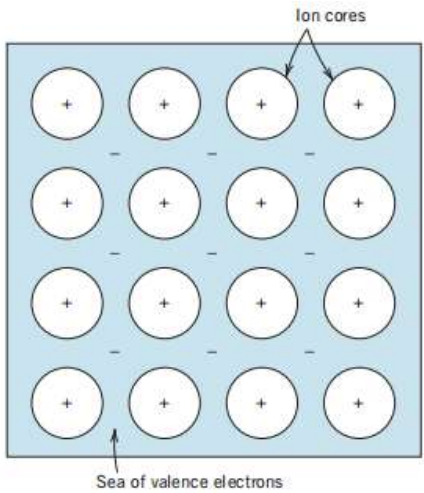
(%IC) dapat diperkirakan menggunakan persamaan berikut;

$$\%IC = \left\{1 - \exp\left[-(0.25)\left(X_A - X_B\right)^2\right]\right\} \times 100$$

di mana X_A dan X_B masing-masing adalah nilai keelektronegatifan dari unsur A dan B (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

2.5.3 Ikatan Logam

Jenis ikatan ini hanya ditemukan dalam logam dan campurannya. Sebuah model dasar telah diciptakan untuk menerangkan cara kerja ikatan ini, yang dapat mendekati keadaan yang sebenarnya dengan cukup akurat.



Gambar 2. 9 Ilustrasi Skematis Dari Ikatan Logam (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Material logam pada umumnya memiliki satu hingga tiga elektron valensi. Dalam konsep ikatan logam, elektron-elektron valensi tersebut tidak terikat pada atom tertentu di dalam struktur padatan, tetapi dapat bergerak relatif bebas ke seluruh bagian logam. Oleh karena itu, elektron-elektron ini dianggap dimiliki bersama oleh seluruh atom dalam struktur logam dan sering digambarkan sebagai "lautan elektron" (*sea of electrons*) atau "awan elektron". Sementara itu, inti atom beserta elektron-elektron selain elektron valensi membentuk inti ion (*ion cores*) yang memiliki muatan positif bersih sesuai jumlah elektron valensi yang dilepaskan tiap atom. Elektron bebas tersebut berperan dalam menutupi (*shielding*) gaya tolak elektrostatik antar inti ion bermuatan positif.

Energi ikatan dan titik leleh logam memiliki rentang yang cukup luas. Kekuatan ikatan logam dapat bervariasi dari relatif lemah hingga sangat kuat, dengan energi ikatan sekitar 68 kJ/mol (0,7 eV per atom) pada merkuri sampai sekitar 849 kJ/mol (8,8 eV per atom) pada tungsten. Variasi ini tercermin pada titik lelehnya, di mana merkuri memiliki titik leleh sekitar −39°C, sedangkan tungsten mencapai sekitar 3410°C.

Ikatan logam dijumpai pada unsur-unsur Golongan IA dan IIA serta hampir seluruh unsur logam dalam tabel periodik. Berbagai sifat umum material seperti logam, keramik, dan polimer dapat dipahami berdasarkan jenis ikatan atom yang dimilikinya.

Selain itu, sebagian besar logam dan paduannya mempunyai sifat atau perilaku ulet (*ductile*), yaitu kemampuan suatu material untuk mengalami deformasi plastis atau perubahan bentuk secara permanen tanpa mudah patah ketika diberi gaya atau beban. Sifat ini berkaitan erat dengan mekanisme deformasi yang

dipengaruhi oleh karakteristik ikatan logam. Sebaliknya, material dengan ikatan ionik cenderung bersifat getas (*brittle*) pada suhu kamar akibat adanya gaya tarik dan gaya tolak elektrostatik antara ion-ion bermuatan di dalam strukturnya (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

2.6 Ikatan Sekunder (Gaya Van der Waals)

Sebagian besar material logam memiliki satu, dua, atau tiga elektron valensi. Pada ikatan logam, elektron-elektron valensi tersebut tidak terikat secara khusus pada satu atom, melainkan dapat bergerak bebas di seluruh struktur padatan logam. Karena itu, elektron-elektron tersebut dianggap sebagai milik bersama seluruh atom dalam logam dan sering disebut sebagai "lautan elektron" (*sea of electrons*) atau "awan elektron". Sementara itu, inti atom bersama elektron-elektron selain elektron valensi membentuk inti ion (*ion cores*) yang bermuatan positif sesuai jumlah elektron valensi yang dilepaskan setiap atom. Keberadaan elektron bebas ini membantu mengurangi gaya tolak elektrostatik antar inti ion positif melalui efek shielding. Oleh sebab itu, ikatan logam bersifat tidak terarah (*nondirectional*). Selain berperan sebagai penahan gaya tolak, elektron bebas juga bertindak sebagai perekat yang mempertahankan keterikatan antar inti ion dalam struktur logam.

Energi ikatan dan titik leleh logam menunjukkan variasi yang cukup besar. Kekuatan ikatan logam dapat berkisar dari lemah hingga sangat kuat, dengan energi ikatan sekitar 68 kJ/mol (0,7 eV per atom) pada merkuri dan mencapai sekitar 849 kJ/mol (8,8 eV per atom) pada tungsten. Perbedaan ini sejalan dengan nilai titik lelehnya, yaitu sekitar −39°C untuk

merkuri dan sekitar 3410°C untuk tungsten (Petrucci, R. H., dkk, 2017).

Ikatan logam terdapat pada unsur-unsur Golongan IA dan IIA serta hampir seluruh unsur logam dalam tabel periodik. Karakteristik umum material seperti logam, keramik, dan polimer pada dasarnya dipengaruhi oleh jenis ikatan atom yang dimilikinya. Sebagai contoh, logam bersifat konduktor listrik dan panas yang sangat baik akibat adanya elektron bebas yang dapat bergerak dengan mudah. Sebaliknya, material dengan ikatan ionik maupun kovalen umumnya bersifat isolator terhadap listrik dan panas karena tidak memiliki elektron bebas dalam jumlah besar.

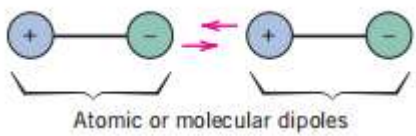
Pada suhu kamar, sebagian besar logam dan paduannya memperlihatkan sifat ulet (*ductile*), yaitu mampu mengalami deformasi plastis yang cukup besar sebelum patah. Perilaku ini berkaitan erat dengan mekanisme deformasi yang dipengaruhi oleh karakteristik ikatan logam. Di sisi lain, material dengan ikatan ionik cenderung bersifat getas (*brittle*) pada suhu kamar akibat adanya interaksi gaya tarik dan gaya tolak elektrostatik antar ion bermuatan di dalam struktur materialnya (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

2.6.1 Ikatan Dipol Terinduksi (*Fluctuating Induced Dipole*)

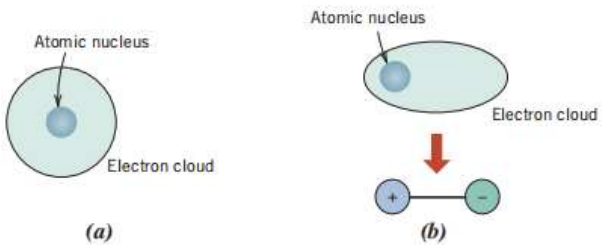
Dipol dapat muncul secara sementara (terinduksi) pada atom atau molekul yang pada kondisi normal memiliki distribusi muatan listrik yang simetris, yaitu distribusi elektron yang merata terhadap inti atom bermuatan positif.

Setiap atom senantiasa mengalami gerakan vibrasi, sehingga pada saat tertentu distribusi elektronnya dapat mengalami distorsi sesaat. Distorsi ini menyebabkan terbentuknya dipol listrik kecil yang bersifat sementara.

Dipol sementara yang terbentuk pada suatu atom atau molekul dapat memengaruhi distribusi elektron pada atom atau molekul di sekitarnya, sehingga menimbulkan dipol terinduksi kedua. Kedua dipol tersebut kemudian mengalami gaya tarik-menarik yang lemah dan menghasilkan salah satu bentuk ikatan sekunder.



Gambar 2. 10 Ikatan van der Waals (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)



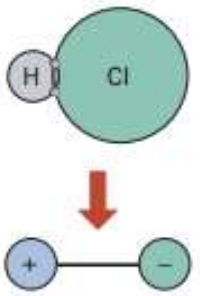
Gambar 2. 11 Representasi Skematis dari (a) Atom Yang Simetris Secara Listrik dan (b) Dipol Atom Terinduksi (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Gaya tarik tersebut termasuk ke dalam salah satu bentuk ikatan van der Waals. Interaksi ini dapat muncul antara berbagai atom maupun molekul, bersifat sementara, dan selalu berubah-ubah seiring berjalannya waktu.

Mekanisme ini berperan dalam proses pencairan, dan pada beberapa kondisi juga pembekuan, pada gas mulia maupun molekul netral dan simetris seperti H_2 dan Cl_2. Material yang didominasi oleh ikatan dipol terinduksi umumnya memiliki titik leleh dan titik didih yang sangat rendah. Dibandingkan dengan gaya antarmolekul lainnya, gaya ini termasuk yang paling lemah (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

2.6.2 Ikatan Dipol Permanen – Dipol Terinduksi

Ikatan jenis ini berperan dalam proses pencairan maupun, pada kondisi tertentu, pembekuan gas mulia serta molekul netral dan simetris seperti H_2 dan Cl_2. Material yang ikatannya didominasi oleh dipol terinduksi umumnya memiliki titik leleh dan titik didih yang sangat rendah. Di antara berbagai gaya antarmolekul, gaya ini merupakan yang paling lemah. Besarnya energi ikatan dan titik leleh untuk unsur-unsur seperti argon dan klorin biasanya dapat ditemukan dalam tabel sifat material.



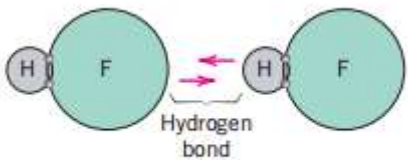
Gambar 2. 12 Gambaran Skematis Representasi HCl (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Molekul polar dapat memicu terbentuknya dipol pada molekul nonpolar di sekitarnya. Interaksi ini menghasilkan gaya tarik antarmolekul yang menyebabkan terbentuknya suatu ikatan. Secara umum, kekuatan ikatan tersebut lebih besar dibandingkan ikatan yang dihasilkan oleh dipol terinduksi sementara.

2.6.3 Ikatan Dipol Permanen

Gaya van der Waals juga dapat terbentuk antara molekul-molekul polar yang saling berdekatan. Energi ikatan yang dihasilkan dari interaksi ini lebih besar dibandingkan interaksi yang hanya melibatkan dipol terinduksi.

Jenis ikatan sekunder yang paling kuat adalah ikatan hidrogen (hydrogen bonding), yang merupakan bentuk khusus dari interaksi antarmolekul polar. Ikatan ini muncul pada molekul yang memiliki atom hidrogen berikatan kovalen dengan atom fluor (HF), oksigen (H_2O), atau nitrogen (NH_3).



Gambar 2. 13 Representasi Skematis Ikatan Hidrogen dalam HF (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020)

Dalam setiap ikatan H–F, H–O, atau H–N, elektron dari atom hidrogen digunakan bersama dengan atom lain. Akibatnya, sisi hidrogen menjadi sangat kekurangan

elektron dan pada dasarnya menyerupai proton bermuatan positif tanpa perlindungan elektron (*unscreened*). Bagian molekul yang sangat positif ini dapat berinteraksi kuat dengan bagian bermuatan negatif dari molekul lain di sekitarnya.

Dengan demikian, atom hidrogen dapat berperan sebagai "jembatan" yang menghubungkan dua atom bermuatan negatif dari molekul yang berbeda. Kekuatan ikatan hidrogen umumnya lebih besar dibandingkan jenis ikatan sekunder lainnya, dengan energi ikatan yang dapat mencapai sekitar 51 kJ/mol (0,52 eV per molekul). Sebagai akibat dari adanya ikatan hidrogen, beberapa senyawa seperti hidrogen fluorida dan air memiliki titik leleh dan titik didih yang relatif tinggi, meskipun massa molekulnya rendah.

Banyak molekul umum tersusun atas kelompok atom yang terikat satu sama lain melalui ikatan kovalen yang kuat. Contohnya meliputi molekul diatomik unsur seperti F_2, O_2, dan H_2, serta berbagai senyawa seperti H_2O, CO_2, HNO_3, C_6H_6, dan CH_4 (Callister, W.D., & Rethwisch, D.G., 2020).

BAB 3
SIFAT MEKANIK MATERIAL

Sifat mekanik material merupakan karakteristik yang menunjukkan perilaku suatu material ketika menerima beban atau gaya dari luar. Pemahaman terhadap sifat mekanik sangat penting dalam bidang teknik sipil, mesin, dan material karena menentukan kemampuan struktur dalam menahan beban, deformasi, serta kegagalan. Setiap material memiliki respons yang berbeda terhadap pembebanan, tergantung pada struktur mikro, komposisi kimia, serta kondisi lingkungan (Callister & Rethwisch, 2018).

Dalam rekayasa konstruksi, kesalahan dalam memahami sifat mekanik material dapat menyebabkan kegagalan struktur yang berakibat pada kerugian ekonomi bahkan korban jiwa. Oleh karena itu, analisis sifat mekanik menjadi dasar dalam perancangan struktur seperti gedung, jembatan, perkerasan jalan, dan komponen mesin.

3.1 Konsep Tegangan dan Regangan

3.1.1 Tegangan (*Stress*)

Tegangan (*stress*) adalah ukuran intensitas gaya dalam yang timbul di dalam suatu material akibat adanya beban luar. Ketika suatu batang atau elemen struktur dikenai gaya, material tersebut akan menahan beban

melalui gaya-gaya internal yang tersebar pada penampangnya. Secara umum, tegangan normal dirumuskan sebagai σ = F/A, di mana *F* adalah gaya yang bekerja tegak lurus terhadap penampang dan *A* adalah luas penampang. Selain tegangan normal (tarik dan tekan), terdapat pula tegangan geser (τ) yang bekerja sejajar terhadap bidang penampang (Hibbeler, 2017, hlm. 5).

Menurut Ferdinand P. Beer dan E. Russell Johnston Jr. dalam buku *Mechanics of Materials*, *"Stress is the intensity of internal forces acting at a point within a body"* (hlm. 4). Definisi ini menekankan bahwa tegangan bukan sekadar gaya luar yang diberikan, melainkan respons internal material terhadap gaya tersebut. Pemahaman mengenai tegangan sangat penting dalam analisis dan perancangan struktur, karena nilai tegangan menentukan apakah material masih berada dalam batas elastis, telah mengalami deformasi plastis, atau mendekati kondisi kegagalan (Gere & Timoshenko, 1997, hlm. 9).

Tegangan adalah gaya yang bekerja pada suatu luas penampang material. Secara matematis dinyatakan sebagai:

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

dimana : σ = Tegangan/*stress* (kg/m^2)

F = Gaya Titik (kg)

A = Luas penampang (m^2)

Menurut Gere dan Timoshenko (1997), tegangan dapat dibedakan menjadi:

- Tegangan tarik
- Tegangan tekan

- Tegangan geser

3.1.2 Regangan (*Strain*)

Regangan (*strain*) adalah ukuran deformasi yang terjadi pada suatu material akibat pembebanan. Secara umum, regangan normal didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang terhadap panjang awal suatu batang, yang dirumuskan sebagai $\varepsilon = \Delta L/L_0$. Besaran ini tidak memiliki satuan karena merupakan rasio dua panjang. Regangan menggambarkan seberapa besar perubahan bentuk yang dialami material ketika dikenai gaya tarik atau tekan. Menurut Ferdinand P. Beer dan E. Russell Johnston Jr. dalam buku *Mechanics of Materials*, regangan normal merupakan parameter dasar untuk menganalisis respons struktur terhadap beban aksial dan menjadi landasan dalam memahami hubungan tegangan–regangan (Beer & Johnston, 2015, hlm. 38).

Regangan adalah perubahan panjang relatif akibat pembebanan, dirumuskan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

dimana : ε = Regangan/*strain* (tanpa dimensi)

ΔL = Pertambahan panjang (mm)

L = panjang bentang (mm)

Regangan bersifat tidak berdimensi dan menunjukkan tingkat deformasi material akibat tegangan (Hibbeler, 2017).

Selain tegangan dan regangan normal, dikenal pula tegangan geser (τ) dan regangan geser (γ) yang terjadi akibat gaya yang bekerja sejajar bidang penampang. Tegangan geser dinyatakan sebagai $\tau = V/A$, sedangkan

regangan geser berkaitan dengan perubahan sudut antar garis yang semula tegak lurus. Dalam daerah elastis, hubungan keduanya mengikuti persamaan $\tau = G\gamma$, dengan G sebagai modulus geser material. Sebagaimana dijelaskan oleh James M. Gere dan Barry J. Goodno dalam Mechanics of Materials, "Within the elastic range, stress is directly proportional to strain" (Gere & Goodno, 2012, hlm. 36). Pemahaman konsep ini sangat penting dalam perancangan struktur dan komponen teknik agar mampu menahan beban tanpa mengalami kegagalan.

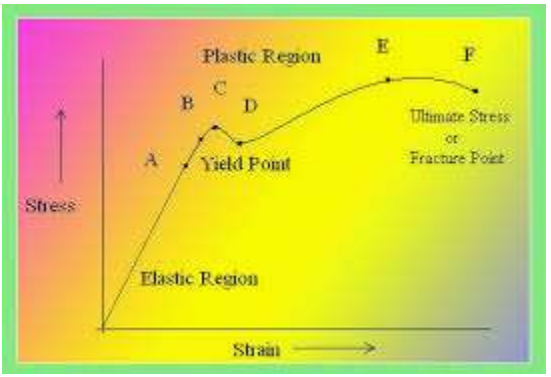
3.1.3 Hubungan Tegangan–Regangan

Konsep tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) merupakan dasar dalam mekanika bahan yang menjelaskan bagaimana suatu material merespons gaya luar.

Apabila pembebanan terus ditingkatkan melewati batas elastis, material memasuki daerah plastis, di mana hubungan tegangan–regangan tidak lagi linier. Pada tahap ini, deformasi permanen mulai terjadi dan material tidak dapat kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan. Kurva tegangan–regangan untuk material ulet seperti baja biasanya menunjukkan titik luluh (yield point), daerah pengerasan regangan (strain hardening), hingga mencapai tegangan maksimum (ultimate strength) sebelum patah. Menurut James M. Gere dan Barry J. Goodno dalam *Mechanics of Materials*, pemahaman kurva ini penting untuk menentukan batas aman penggunaan material dalam perancangan struktur (Gere & Goodno, 2012, hlm. 98).

Selain itu, hubungan tegangan–regangan juga mencakup fenomena regangan lateral yang dijelaskan melalui rasio Poisson (ν), yaitu perbandingan antara regangan lateral dan regangan longitudinal. Ketika suatu batang ditarik, panjangnya bertambah tetapi dimensinya

dalam arah lateral berkurang. Hubungan ini dinyatakan sebagai ε_lateral = −νε_longitudinal. Konsep rasio Poisson dan modulus elastisitas bersama-sama membentuk dasar teori elastisitas linier yang digunakan secara luas dalam analisis teknik. Sebagaimana dijelaskan oleh Beer dkk., parameter-parameter elastis ini memungkinkan perhitungan deformasi tiga dimensi pada elemen struktur (Beer & Johnston, 2015, hlm. 52).



Gambar 2. 14 Hubungan Tegangan Regangan

Sumber: Beer & Johnston (2015, hlm. 44)

Berikut adalah keterangan titik-titik pada diagram tegangan-regangan sebagai berikut:

a. Titik A (Awal Kurva), menandai awal dari pengujian di mana material mulai mengalami regangan kecil. Pada daerah ini, tegangan dan regangan mulai bertambah secara linier, masih dalam daerah elastis.

b. Titik B (Batas Proporsional / Elastic Limit), pada titik ini, hubungan tegangan dan regangan masih linier dan sesuai dengan Hukum Hooke. Material masih bisa kembali ke bentuk semula jika beban dilepaskan.

c. Titik C (Titik Luluh / Yield Point), material mulai mengalami deformasi plastis, yaitu regangan permanen yang tidak dapat kembali ke bentuk awal meskipun beban dilepaskan. Biasanya ditandai dengan penurunan tegangan sesaat sebelum stabil.

d. Titik D (Akhir Daerah Plastis Awal), setelah titik luluh, tegangan sedikit menurun sebelum mulai naik kembali karena pengerasan regangan (strain hardening).

e. Titik E (Tegangan Maksimum/Ultimate Stress), ini adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh material sebelum mengalami necking dan akhirnya patah. Setelah titik ini, tegangan menurun menuju patah.

f. Ttik F (Batas Keruntuhan)

g. Diagram tegangan–regangan menggambarkan hubungan antara tegangan (σ) pada sumbu vertikal dan regangan (ε) pada sumbu horizontal yang diperoleh dari uji tarik material. Pada bagian awal kurva terdapat daerah elastis linier, di mana hubungan $\sigma = E\varepsilon$ berlaku sesuai Hukum Hooke. Kemiringan kurva pada daerah ini adalah modulus elastisitas (E). Menurut Ferdinand P. Beer dan E. Russell Johnston Jr. dalam *Mechanics of Materials*, batas linier ini disebut batas proporsional, dan selama tegangan masih berada di bawah batas tersebut, material akan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan (Beer & Johnston, 2015, hlm. 43).

Setelah melewati batas elastis, material memasuki titik luluh (yield point), terutama jelas pada baja lunak, di mana terjadi deformasi plastis tanpa peningkatan tegangan yang signifikan. Di daerah plastis, kurva tidak lagi linier dan deformasi permanen terjadi. Tegangan

kemudian meningkat kembali hingga mencapai tegangan maksimum (ultimate tensile strength/UTS), yaitu titik tertinggi pada kurva. Menurut James M. Gere dan Barry J. Goodno dalam *Mechanics of Materials*, setelah UTS tercapai, terjadi penurunan tegangan teknik akibat fenomena leheran (necking) hingga akhirnya material mengalami patah (fracture) (Gere & Goodno, 2012, hlm. 97–100).

Secara umum, titik-titik penting dalam diagram tegangan–regangan meliputi: (1) batas proporsional, (2) batas elastis, (3) titik luluh, (4) tegangan maksimum, dan (5) titik patah. Diagram ini sangat penting dalam perancangan teknik karena memberikan informasi mengenai kekakuan, keuletan, dan kekuatan material, sehingga insinyur dapat menentukan batas aman operasi struktur (Beer & Johnston, 2015, hlm. 45).

3.1.4 Modulus Elastisitas

Hubungan tegangan–regangan dalam mekanika bahan menjelaskan bagaimana suatu material merespons beban yang diberikan kepadanya. Ketika gaya bekerja pada suatu batang atau elemen struktur, timbul tegangan (*stress*) yang didefinisikan sebagai gaya per satuan luas, sedangkan regangan (*strain*) menyatakan deformasi relatif akibat tegangan tersebut. Menurut Ferdinand P. Beer dan E. Russell Johnston Jr. dalam *Mechanics of Materials*, hubungan linier ini berlaku selama tegangan tidak melebihi batas proporsional material (Beer & Johnston, 2015, hlm. 43).

Hubungan antara tegangan dan regangan digambarkan dalam kurva tegangan–regangan. Pada daerah elastis berlaku Hukum Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon$$

dimana : σ = Tegangan/*stress* (kg/m^2)

ε = Gaya Titik (kg)

E = Luas penampang (m^2)

Material seperti baja menunjukkan daerah elastis dan plastis yang jelas, sedangkan beton memiliki perilaku getas (brittle) tanpa daerah plastis yang signifikan (Neville, 2011).

Modulus elastisitas (E) adalah ukuran kekakuan material. Nilai E tinggi menunjukkan material lebih kaku.

Contoh:

- Baja: ± 200 GPa
- Beton: 20–30 GPa
- Aspal: jauh lebih rendah dan tergantung temperatur

Menurut Callister dan Rethwisch (2018), modulus elastisitas berkaitan dengan kekuatan ikatan atom dalam material.

3.2 Kekuatan Material sebagai Sifat Mekanik

3.2.1 Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik (*tensile strength*) merupakan salah satu parameter utama dalam kekuatan material yang menunjukkan kemampuan suatu material untuk menahan beban tarik maksimum sebelum mengalami patah. Nilai ini diperoleh dari uji tarik dan biasanya dinyatakan sebagai tegangan maksimum pada kurva tegangan–regangan, yang dikenal sebagai ultimate tensile strength (UTS). Kekuatan tarik mencerminkan ketahanan material terhadap deformasi plastis berlebihan dan kegagalan struktural akibat gaya tarik.

Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam Materials Science and Engineering: *An Introduction, "The tensile strength corresponds to the maximum stress that can be sustained by a specimen in a tension test"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 160), yang menegaskan bahwa kekuatan tarik adalah batas maksimum tegangan sebelum terjadinya penurunan kapasitas akibat leheran (*necking*) dan patah**.** Jadi Kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength*/UTS) adalah tegangan maksimum sebelum material mengalami patah.

3.2.2 Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan (*compressive strength*) merupakan parameter kekuatan material yang menunjukkan kemampuan suatu material untuk menahan beban tekan maksimum sebelum mengalami deformasi plastis berlebihan atau keruntuhan. Nilai ini diperoleh melalui uji tekan, di mana spesimen diberi beban aksial tekan hingga mencapai batas tertentu atau hancur. Kekuatan tekan sangat penting pada material seperti beton, keramik, dan beberapa logam yang dalam aplikasinya lebih sering menerima beban tekan dibandingkan tarik. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam Materials Science and Engineering: *An Introduction, "Compression tests are used to determine the mechanical behavior of materials under compressive loads"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 164), yang menunjukkan bahwa kekuatan tekan menjadi indikator utama ketahanan material terhadap gaya desak.

Material seperti beton memiliki kekuatan tekan jauh lebih tinggi dibanding kekuatan tarik (Neville, 2011).

3.2.3 Kekuatan Geser

Kekuatan geser (*shear strength*) merupakan parameter kekuatan material yang menunjukkan kemampuan suatu material untuk menahan tegangan geser maksimum sebelum mengalami kegagalan atau pergeseran internal. Tegangan geser terjadi ketika gaya bekerja sejajar terhadap bidang penampang material, dan secara umum dinyatakan sebagai $\tau = V/A$. Kekuatan geser penting dalam perancangan komponen seperti baut, paku keling, dan sambungan struktur yang mengalami beban transversal. Menurut Ferdinand P. Beer dan E. Russell Johnston Jr. dalam *Mechanics of Materials, "Average shear stress is obtained by dividing the shear force by the area over which it acts"* (Beer & Johnston, 2015, hlm. 32), yang menjadi dasar dalam menentukan batas kekuatan geser suatu material.

3.2.4 Kekuatan Lentur

Kekuatan lentur (*flexural strength*) merupakan parameter kekuatan material yang menunjukkan kemampuan suatu material untuk menahan tegangan maksimum akibat pembebanan lentur sebelum terjadi patah. Pada kondisi pembebanan ini, satu sisi material mengalami tegangan tarik sementara sisi lainnya mengalami tegangan tekan, sehingga kekuatan lentur mencerminkan kombinasi respons terhadap kedua jenis tegangan tersebut. Nilai kekuatan lentur umumnya diperoleh melalui uji lentur tiga titik atau empat titik dan sangat penting untuk material getas seperti keramik dan beton. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam Materials Science and Engineering: An Introduction, "*The flexural strength is determined from a bending test and represents the stress at fracture in bending*" (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 168), yang

menunjukkan bahwa kekuatan lentur adalah tegangan maksimum saat material patah akibat pembebanan melengkung.

3.3 Sifat Mekanik Lainnya

3.3.1 Keuletan (*Ductility*)

Durability (daya tahan) sebagai sifat mekanik material mengacu pada kemampuan material untuk mempertahankan kinerja dan integritas mekaniknya dalam jangka waktu lama ketika mengalami beban, keausan, atau kondisi lingkungan tertentu tanpa mengalami kerusakan signifikan. Dalam konteks mekanik, *durability* sering dikaitkan dengan ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue*), creep, dan degradasi akibat tegangan berulang atau beban jangka panjang. Material dengan durability tinggi mampu mempertahankan kekuatan dan kekakuannya selama masa pakai yang direncanakan. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam Materials Science and Engineering: *An Introduction, "Fatigue is a form of failure that occurs in structures subjected to dynamic and fluctuating stresses"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 222), yang menunjukkan bahwa ketahanan terhadap pembebanan berulang merupakan aspek penting dalam menilai durability suatu material.

Keuletan adalah kemampuan material mengalami deformasi plastis sebelum patah. Baja tergolong material ulet, sedangkan beton dan keramik tergolong getas (*brittle*).

Parameter keuletan dapat diukur melalui persen perpanjangan (*elongation*) atau reduksi luas penampang (Dieter, 1986).

3.3.2 Ketangguhan (*Toughness*)

Ketangguhan sebagai sifat mekanik bahan merujuk pada kemampuan material untuk menyerap energi dan mengalami deformasi plastis sebelum akhirnya patah, sehingga mencerminkan kombinasi antara kekuatan dan keuletan dalam satu parameter kinerja. Secara kuantitatif, ketangguhan sering diukur dari luas daerah di bawah kurva tegangan–regangan hingga titik patah, yang menunjukkan energi per satuan volume yang dapat diserap material sebelum kegagalan. Menurut William D. Callister dan David Rethwisch, *"toughness is a measure of the ability of a material to absorb energy up to fracture"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 236), sehingga material yang tangguh tidak hanya kuat menahan beban, tetapi juga mampu menahan perambatan retak secara efektif. Sifat ini sangat penting dalam aplikasi struktural seperti konstruksi bangunan, jembatan, dan komponen mesin yang mengalami beban dinamis atau impak.

3.3.3 Kekerasan (*Hardness*)

Kekerasan sebagai sifat mekanik bahan menunjukkan kemampuan suatu material untuk menahan deformasi plastis lokal, khususnya terhadap penetrasi, goresan, atau indentasi pada permukaannya. Secara praktis, kekerasan diukur menggunakan metode seperti Brinell, Vickers, atau Rockwell, yang menilai ketahanan material terhadap penekanan oleh indentor dengan geometri dan beban tertentu. Nilai kekerasan sering berkorelasi dengan kekuatan tarik dan ketahanan aus, sehingga menjadi parameter penting dalam pemilihan bahan untuk komponen yang mengalami

gesekan atau kontak berulang. Menurut William D. Callister dan David Rethwisch, *"hardness is a measure of a material's resistance to localized plastic deformation"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 228), sehingga semakin tinggi nilai kekerasan suatu bahan, semakin besar kemampuannya menahan perubahan bentuk permanen pada permukaan.

Kekerasan adalah ketahanan material terhadap penetrasi atau goresan. Metode pengujian kekerasan meliputi:

- Brinell
- Rockwell
- Vickers

Kekerasan sering berkorelasi dengan kekuatan tarik material (Callister & Rethwisch, 2018).

3.3.4 Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan (*fatigue*) sebagai sifat mekanik bahan merujuk pada kecenderungan material mengalami kerusakan atau patah akibat pembebanan berulang (siklik) yang besarnya bisa jauh di bawah kekuatan tarik maksimumnya. Proses kelelahan umumnya diawali dengan inisiasi retak mikro pada titik konsentrasi tegangan, yang kemudian merambat secara bertahap hingga terjadi patah mendadak tanpa deformasi plastis yang signifikan. Oleh karena itu, sifat ini sangat krusial dalam perancangan komponen seperti poros, pegas, dan struktur jembatan yang menerima beban dinamis terus-menerus. Menurut William D. Callister dan David Rethwisch, "*fatigue is a form of failure that occurs in structures subjected to dynamic and fluctuating stresses*" (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 282), sehingga

pemahaman terhadap perilaku kelelahan penting untuk mencegah kegagalan tak terduga pada material teknik.

Kelelahan adalah kegagalan material akibat beban berulang yang lebih kecil dari kekuatan maksimum. Fenomena ini sangat penting pada jembatan, perkerasan jalan, dan komponen mesin.

Menurut Stephens *et al*. (2001), kegagalan akibat fatigue terjadi dalam tiga tahap:

1. Inisiasi retak
2. Perambatan retak
3. Fraktur akhir

3.3.5 Rayapan (*Creep*)

Rayapan (*creep*) sebagai sifat mekanik bahan adalah kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis secara perlahan di bawah beban konstan dalam jangka waktu yang panjang, terutama pada suhu tinggi. Sifat ini sangat penting untuk material yang digunakan dalam turbin gas, boiler, atau komponen pesawat, di mana beban tetap bekerja dalam kondisi panas. Proses rayapan biasanya dibagi menjadi tiga tahap: tahap awal dengan laju deformasi menurun, tahap sekunder dengan laju konstan, dan tahap akhir dengan percepatan deformasi hingga patah. Menurut William D. Callister dan David Rethwisch, *"creep is time-dependent deformation under a constant load, often occurring at elevated temperature"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 304), sehingga pemilihan material yang memiliki ketahanan rayap yang baik sangat penting untuk keselamatan dan umur pakai struktur.

Creep adalah deformasi permanen yang terjadi akibat pembebanan konstan dalam jangka waktu lama, terutama pada temperatur tinggi.

Beton dan aspal sangat rentan terhadap creep. Pada beton, creep menyebabkan lendutan jangka panjang pada balok (Neville, 2011).

3.3.6 Ketahanan Retak (*Fracture Mechanics*)

Ketahanan retak (*fracture toughness*) sebagai sifat mekanik bahan menunjukkan kemampuan material untuk menahan pertumbuhan retak yang sudah ada tanpa mengalami patah total. Sifat ini mencerminkan resistensi bahan terhadap kegagalan akibat konsentrasi tegangan di ujung retak dan sangat penting dalam desain struktur yang mengalami beban dinamis atau kondisi kritis, seperti pesawat terbang, jembatan, dan komponen tekanan tinggi. Semakin tinggi ketahanan retak suatu material, semakin besar energi yang dapat diserap sebelum terjadinya patah, sehingga mengurangi risiko kegagalan mendadak. Menurut William D. Callister dan David Rethwisch, "fracture toughness is a measure of a material's resistance to fracture when a crack is present" (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 290), sehingga material dengan ketahanan retak tinggi lebih aman digunakan pada aplikasi kritis.

Mekanika retak mempelajari perambatan retak dalam material. Parameter pentingnya adalah fracture toughness (K_IC).

Material getas memiliki nilai K_IC rendah, sehingga retak mudah berkembang tanpa deformasi signifikan sebelumnya (Anderson, 2017).

3.5 Sifat Mekanik pada Beberapa Material

3.5.1 Beton

Kuat tekan beton sebagai sifat mekanik bahan menunjukkan kemampuan beton untuk menahan beban tekan sebelum mengalami kerusakan. Sifat ini merupakan parameter utama dalam desain struktur beton, karena sebagian besar elemen beton, seperti kolom dan balok, bekerja terutama dalam kondisi tekan. Kuat tekan biasanya diukur melalui uji silinder atau kubus beton setelah masa perawatan tertentu, umumnya 28 hari, untuk memastikan kualitas dan konsistensi material. Menurut Neville bahwa: "perancangan beton struktural selalu mempertimbangkan kuat tekan sebagai faktor utama untuk keselamatan dan daya tahan." (Neville, 2012, hlm. 320).

a. Kuat tekan tinggi

Kuat tekan tinggi (*high-strength*) pada beton adalah klasifikasi beton yang memiliki kemampuan menahan beban tekan jauh lebih besar dibanding beton konvensional, biasanya di atas 50 MPa. Beton jenis ini dicapai melalui perancangan campuran yang optimal, penggunaan agregat berkualitas tinggi, semen dengan kinerja tinggi, dan metode perawatan yang tepat, sehingga menghasilkan material yang padat dan tahan lama. Sifat kuat tekan tinggi sangat penting dalam konstruksi gedung tinggi, jembatan, dan struktur dengan beban ekstrem, karena memungkinkan penggunaan elemen yang lebih ramping tanpa mengorbankan keselamatan. Menurut Mehta dan Monteiro bahwa, "beton berkekuatan tinggi menunjukkan kekuatan tekan yang secara signifikan lebih tinggi dibanding beton konvensional dan menawarkan daya tahan

yang lebih baik serta ketahanan terhadap retak." (Mehta & Monteiro, 2014, hlm. 150), sehingga pemilihan beton ini menjadi kunci dalam desain struktur modern yang efisien dan aman.

b. Kuat tarik rendah

Kuat tarik rendah pada beton merupakan sifat mekanik yang menunjukkan bahwa beton, meskipun memiliki kuat tekan tinggi, memiliki kemampuan yang terbatas untuk menahan gaya tarik sebelum retak muncul. Hal ini disebabkan struktur mikro beton yang dominan terdiri dari semen dan agregat, sehingga mudah mengalami retak ketika diberikan beban tarik murni. Oleh karena itu, dalam praktiknya beton sering diperkuat dengan baja tulangan untuk mengatasi kelemahan tarik ini dan meningkatkan performa strukturalnya. Menurut Neville bahwa, "beton secara inheren lemah terhadap tarik, dan kuat tariknya hanya sekitar 10–15% dari kuat tekan" (Neville, 2012, hlm. 328). Karena lemah terhadap tarik, beton biasanya dikombinasikan dengan baja tulangan (beton bertulang).

c. Getas

Sifat getas pada beton berkaitan dengan kecenderungan material ini untuk mengalami patah secara tiba-tiba tanpa deformasi plastis yang signifikan setelah mencapai kuat tekannya. Meskipun beton memiliki kuat tekan yang tinggi, perilakunya di bawah beban tekan maksimum umumnya menunjukkan regangan ultimit yang kecil, sehingga kegagalan terjadi secara mendadak dan relatif tanpa peringatan. Karakter getas ini semakin jelas pada beton mutu tinggi, yang biasanya memiliki deformasi lebih kecil sebelum runtuh

dibanding beton normal. Menurut Neville bahwa, "beton pada kondisi tekan menunjukkan perilaku getas, khususnya pada tingkat kuat tekan yang lebih tinggi" (Neville, 2012, hlm. 334), sehingga dalam perancangan struktur diperlukan faktor keamanan dan detailing tulangan yang memadai untuk meningkatkan daktilitas serta mengurangi risiko kegagalan mendadak.

d. Mengalami creep dan shrinkage

Beton mengalami creep (rayapan) dan shrinkage (susut) sebagai bagian dari perilaku deformasi jangka panjang yang memengaruhi kinerja kuat tekan dalam struktur. Creep adalah deformasi bertahap akibat beban tetap dalam waktu lama, sedangkan shrinkage adalah penyusutan volume yang terjadi tanpa beban akibat hilangnya kelembapan atau proses hidrasi semen. Kedua fenomena ini dapat menyebabkan penurunan tegangan internal, redistribusi gaya dalam elemen struktur, serta timbulnya retak yang pada akhirnya memengaruhi kapasitas efektif beton dalam menahan tekan. Menurut Neville, "creep adalah peningkatan regangan seiring waktu di bawah tegangan yang dipertahankan, sedangkan shrinkage adalah penyusutan beton akibat kehilangan kelembapan dan penyebab lainnya." (Neville, 2012, hlm. 441), sehingga pemahaman terhadap creep dan shrinkage sangat penting dalam perencanaan struktur beton jangka panjang.

3.5.2 Sifat Mekanik Baja

Baja memiliki:

a. Modulus elastisitas tinggi

Baja memiliki modulus elastisitas yang tinggi, yang menunjukkan kemampuannya menahan deformasi elastis ketika dikenai beban. Modulus elastisitas (Young's modulus) menyatakan perbandingan antara tegangan dan regangan dalam daerah elastis, sehingga semakin tinggi nilainya, semakin kecil regangan yang terjadi untuk tegangan tertentu. Pada baja, modulus elastisitas umumnya sekitar 200 GPa, menjadikannya sangat kaku dan efektif digunakan dalam struktur yang memerlukan kontrol lendutan dan stabilitas tinggi, seperti gedung bertingkat dan jembatan. Menurut Callister dan Rethwisch bahwa: "modulus elastisitas adalah ukuran kekakuan suatu material." (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 124), sehingga tingginya modulus elastisitas baja menjadi salah satu alasan utama penggunaannya dalam konstruksi dan rekayasa struktur.

b. Kekuatan tarik tinggi

Baja memiliki kekuatan tarik tinggi yang menunjukkan kemampuannya menahan beban tarik maksimum sebelum mengalami leleh dan akhirnya patah. Sifat ini menjadikan baja sangat andal dalam elemen struktur yang mengalami gaya tarik dominan, seperti batang tarik, kabel, dan tulangan beton bertulang. Kekuatan tarik baja dipengaruhi oleh komposisi kimia, perlakuan panas, dan proses pembentukan, sehingga dapat direkayasa untuk mencapai tingkat kekuatan tertentu sesuai kebutuhan desain. Menurut Callister dan Rethwisch bahwa: "kekuatan tarik adalah

tegangan maksimum yang dapat ditahan suatu material saat ditarik sebelum terjadi penyempitan penampang (necking).” (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 135), sehingga tingginya kekuatan tarik baja menjadi faktor utama dalam aplikasinya pada konstruksi dan rekayasa teknik.

c. Keuletan baik

Baja memiliki keuletan yang baik, yaitu kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis yang signifikan sebelum patah. Sifat ini memungkinkan baja untuk menyerap energi dan menyesuaikan bentuknya saat menerima beban berlebih, sehingga mengurangi risiko patah mendadak pada struktur. Keuletan ini juga penting dalam desain elemen struktural yang menghadapi beban dinamis atau kejutan, karena baja dapat menahan deformasi lokal tanpa kehilangan integritas keseluruhan. Menurut Callister dan Rethwisch bahwa: “keuletan adalah kemampuan suatu material untuk mengalami deformasi plastis yang signifikan sebelum patah.” (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 140), sehingga keuletan yang tinggi membuat baja menjadi bahan pilihan utama dalam konstruksi dan rekayasa teknik.

d. Perilaku elastis–plastis yang jelas

Baja memiliki perilaku elastis–plastis yang jelas, ditandai dengan adanya batas leleh (yield point) yang tegas pada kurva tegangan–regangan. Pada tahap elastis, baja akan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan, mengikuti hubungan linier antara tegangan dan regangan sesuai Hukum Hooke. Setelah melewati titik leleh, baja memasuki daerah plastis, di mana terjadi deformasi permanen sebelum akhirnya mencapai

tegangan maksimum dan patah. Karakteristik ini memberikan keunggulan dalam desain struktur karena memungkinkan redistribusi tegangan dan memberikan peringatan sebelum kegagalan total. Menurut Callister dan Rethwisch bahwa: "pada banyak jenis baja, perilaku tegangan–regangan menunjukkan titik leleh yang jelas yang menandai transisi dari deformasi elastis ke deformasi plastis" (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 146), sehingga kejelasan perilaku elastis–plastis baja sangat penting dalam analisis dan perencanaan struktur teknik.

Baja struktural banyak digunakan pada gedung tinggi dan jembatan karena sifat mekaniknya yang unggul (Hibbeler, 2017).

3.5.3 Sifat Mekanik Aspal

a. Viskoelastisitas

Aspal bersifat viskoelastis, yaitu menunjukkan kombinasi perilaku elastis (mampu kembali ke bentuk semula setelah beban dilepas) dan viskos (mengalami deformasi permanen seiring waktu), sehingga respons mekaniknya sangat dipengaruhi oleh suhu dan kecepatan pembebanan. Pada suhu rendah atau pembebanan cepat, aspal cenderung bersifat elastis dan kaku, sedangkan pada suhu tinggi atau pembebanan lambat, aspal menunjukkan perilaku lebih viskos dan mudah mengalami deformasi permanen (rutting). Sifat viskoelastis ini menyebabkan fenomena seperti creep (rayapan) dan relaksasi tegangan, yang sangat penting dalam analisis kinerja perkerasan jalan karena mempengaruhi ketahanan terhadap retak dan

deformasi jangka panjang (Huang, 2004, hlm. 45; Roberts *et al*., 1996, hlm. 112).

b. Sensitivitas terhadap Suhu (T*emp. Susceptibility*)

Sensitivitas terhadap suhu merupakan salah satu sifat mekanik penting pada aspal karena sangat mempengaruhi kekakuan dan deformasi material dalam kondisi pelayanan. Aspal bersifat termoplastik, sehingga pada suhu tinggi akan menjadi lebih lunak dan rentan terhadap deformasi permanen (rutting), sedangkan pada suhu rendah akan menjadi lebih kaku dan rapuh sehingga mudah mengalami retak (thermal cracking). Perubahan suhu ini menyebabkan variasi modulus kekakuan serta respons viskoelastis aspal terhadap beban lalu lintas, sehingga analisis kinerja perkerasan harus mempertimbangkan kondisi temperatur lingkungan. Oleh karena itu, parameter seperti temperature susceptibility digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana perubahan suhu mempengaruhi sifat mekanik aspal dalam mempertahankan stabilitas dan daya tahan terhadap kerusakan (Huang, 2004, hlm. 47; Roberts *et al*., 1996, hlm. 105).

c. Ketahanan terhadap Deformasi Permanen (*Rutting Resistance*)

Ketahanan terhadap deformasi permanen (*rutting resistance*) merupakan sifat mekanik penting pada campuran aspal yang menunjukkan kemampuan material dalam menahan perubahan bentuk permanen akibat pembebanan berulang, terutama pada suhu tinggi. Deformasi permanen terjadi ketika tegangan yang bekerja melebihi kemampuan aspal untuk kembali ke bentuk semula,

sehingga menyebabkan alur (rut) pada permukaan perkerasan. Faktor yang mempengaruhi rutting resistance antara lain kekakuan aspal, gradasi agregat, kepadatan campuran, serta suhu operasi, di mana suhu tinggi cenderung menurunkan kekakuan dan meningkatkan risiko deformasi. Oleh karena itu, pengendalian sifat viskoelastis dan stabilitas campuran sangat diperlukan untuk meningkatkan ketahanan terhadap rutting dan menjaga kinerja perkerasan dalam jangka panjang (Huang, 2004, hlm. 211; Roberts *et al*., 1996, hlm. 233).

d. Daya Lekat (*Adhesion*) dan Kohesi

Daya lekat (*adhesion*) dan kohesi (*cohesion*) merupakan sifat mekanik penting pada aspal yang berkaitan dengan kemampuan ikatan antara aspal dan agregat serta kekuatan internal aspal itu sendiri. Adhesion menunjukkan kemampuan aspal untuk melekat kuat pada permukaan agregat, sehingga dapat mempertahankan integritas campuran dan mencegah terjadinya stripping akibat pengaruh air. Sementara itu, kohesi menggambarkan kekuatan ikatan antar molekul dalam aspal yang berperan dalam menahan gaya tarik dan geser tanpa mengalami kerusakan. Kedua sifat ini sangat dipengaruhi oleh jenis aspal, karakteristik agregat, serta kondisi lingkungan seperti kelembaban dan suhu. Kelemahan pada adhesion atau kohesi dapat menyebabkan kerusakan dini pada perkerasan, seperti pelepasan butiran agregat dan penurunan kekuatan struktural campuran aspal (Huang, 2004, hlm. 63; Roberts *et al*., 1996, hlm. 150).

3.6 Faktor yang Mempengaruhi Sifat Mekanik

3.6.1 Struktur Mikro

Struktur mikro merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi sifat mekanik material karena karakteristik seperti ukuran butir, bentuk dan distribusi fasa, batas butir, serta keberadaan cacat kristal (dislokasi, pori, inklusi) secara langsung menentukan kekuatan, kekerasan, dan keuletan material. Misalnya, semakin kecil ukuran butir, umumnya kekuatan luluh meningkat sesuai dengan hubungan Hall–Petch karena batas butir menghambat pergerakan dislokasi. Selain itu, distribusi fasa yang homogen dapat meningkatkan kombinasi kekuatan dan ketangguhan, sedangkan cacat mikro dapat menjadi titik awal terjadinya retak. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam *Materials Science and Engineering: An Introduction, "The mechanical characteristics of materials are determined by their microstructure" (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 134)*, yang menegaskan bahwa sifat mekanik tidak hanya ditentukan oleh komposisi kimia, tetapi juga oleh susunan internal material pada skala mikroskopis

3.6.2 Komposisi Kimia

Komposisi kimia merupakan faktor penting yang memengaruhi sifat mekanik material karena jenis dan kadar unsur penyusun menentukan struktur kristal, pembentukan fasa, serta mekanisme penguatan yang terjadi di dalam material. Pada paduan logam, penambahan unsur tertentu dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan melalui mekanisme penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*), presipitasi, maupun pembentukan fasa baru yang lebih keras. Sebagai contoh, peningkatan kadar karbon pada baja akan menaikkan kekuatan dan kekerasan, tetapi dapat

menurunkan keuletan. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam Materials Science and Engineering: An Introduction, "*The properties of materials are influenced by their composition and structure*" (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 13), yang menunjukkan bahwa komposisi kimia berperan langsung dalam menentukan karakteristik mekanik suatu material.

3.6.3 Temperatur

Temperatur merupakan faktor penting yang memengaruhi sifat mekanik material karena perubahan suhu dapat mengubah mekanisme deformasi dan pergerakan dislokasi di dalam struktur kristal; pada umumnya, peningkatan temperatur menurunkan kekuatan dan kekerasan tetapi meningkatkan keuletan, sedangkan pada temperatur rendah material cenderung menjadi lebih getas. Pada logam, kenaikan suhu mempercepat difusi atom dan mempermudah deformasi plastis, sehingga batas luluh menurun. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch bahwa seiring meningkatnya temperatur, kekuatan luluh dan kekuatan tarik suatu logam menurun, sedangkan keuletannya meningkat (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 196).

3.6.4 Laju pembebanan

Laju pembebanan (*strain rate*) memengaruhi sifat mekanik karena respons material bergantung pada kecepatan deformasi yang dikenakan; pada banyak logam, peningkatan laju regangan cenderung meningkatkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik, tetapi dapat menurunkan keuletan karena pergerakan dislokasi menjadi lebih terbatas dalam waktu yang singkat. Pada kondisi pembebanan sangat cepat, seperti benturan, material dapat menunjukkan perilaku lebih

getas dibandingkan pembebanan statis. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam Materials Science and Engineering: An Introduction, "Mechanical properties are strain rate dependent; increasing the strain rate generally increases the yield and tensile strengths" (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 198).

3.6.4 Lingkungan (Kelembaban, Korosi)

Lingkungan, khususnya kelembaban dan kondisi korosif, merupakan faktor penting yang mempengaruhi sifat mekanik bahan perkerasan, termasuk aspal. Kelembaban dapat menyebabkan terjadinya *moisture damage* atau stripping, yaitu terlepasnya ikatan antara aspal dan agregat akibat penetrasi air ke dalam campuran, sehingga menurunkan kekuatan dan stabilitas struktur perkerasan. Selain itu, air yang masuk ke dalam pori-pori dapat mempercepat proses degradasi material melalui siklus basah-kering maupun pembekuan-pencairan pada daerah tertentu. Sementara itu, kondisi lingkungan yang mengandung zat kimia agresif dapat mempercepat proses oksidasi pada aspal, yang menyebabkan peningkatan kekakuan dan kerapuhan material seiring waktu. Oleh karena itu, pengaruh kelembaban dan korosi harus diperhitungkan dalam desain campuran untuk menjaga daya tahan dan kinerja jangka panjang perkerasan (Huang, 2004, hlm. 89; Roberts *et al*., 1996, hlm. 175).

3.7 Pengujian Sifat Mekanik

3.7.1 Uji tarik (*Tensile Test*)

Uji tarik merupakan metode pengujian sifat mekanik yang paling umum digunakan untuk menentukan hubungan tegangan–regangan suatu material, serta memperoleh parameter penting seperti kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum, modulus elastisitas, dan keuletan. Dalam pengujian ini, spesimen ditarik secara aksial hingga mengalami deformasi dan akhirnya patah, sementara beban dan pertambahan panjang dicatat untuk membentuk kurva tegangan–regangan. Dari kurva tersebut dapat dianalisis perilaku elastis dan plastis material. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam *Materials Science and Engineering: An Introduction, "The tensile test is one of the most common mechanical stress-strain tests"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 156), yang menegaskan pentingnya uji tarik dalam karakterisasi sifat mekanik material.

3.7.2 Uji tekan (*Compression Test*)

Uji tekan (*compression test*) adalah metode pengujian sifat mekanik yang digunakan untuk menentukan perilaku material saat dikenai beban tekan aksial, termasuk kekuatan tekan maksimum, modulus elastis, dan kemampuan material menahan deformasi tanpa patah. Uji ini sangat relevan untuk material yang mengalami beban tekan dalam aplikasi nyata, seperti beton, logam, dan polimer padat. Selama pengujian, spesimen ditekan hingga terjadi deformasi plastis atau kegagalan, dan data tegangan–regangan dicatat untuk analisis. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam *Materials Science and Engineering: An Introduction, "Compression tests are used to determine the*

mechanical behavior of materials under axial compressive loads" (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 164), yang menegaskan pentingnya uji tekan untuk menilai kekuatan dan kekakuan material terhadap beban tekan.

3.7.3 Uji Lentur (*Flexural Test*)

Uji lentur (*bending test*) merupakan metode pengujian sifat mekanik yang digunakan untuk menentukan kekuatan lentur dan modulus elastisitas suatu material dengan cara memberikan beban pada spesimen hingga mengalami deformasi atau patah. Pengujian ini sering diterapkan pada material getas seperti keramik dan komposit, karena lebih mudah dilakukan dibandingkan uji tarik untuk material yang sulit dijepit. Pada uji lentur tiga titik atau empat titik, distribusi tegangan tarik dan tekan terjadi secara bersamaan di sepanjang penampang spesimen. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam Materials Science and Engineering: *An Introduction, "The flexural strength is determined from a bending test, frequently used for brittle materials"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 168), yang menunjukkan bahwa uji lentur penting untuk mengevaluasi kekuatan material terhadap pembebanan melengkung.

3.7.4 Uji Impak (*Charpy*/*Izod*)

Uji impak (*impact test*) adalah metode pengujian sifat mekanik yang digunakan untuk menilai ketangguhan dan kemampuan material menyerap energi ketika mengalami beban mendadak atau benturan. Uji ini sangat berguna untuk mengevaluasi perilaku material getas maupun ductile pada kondisi dinamis, seperti baja dan logam konstruksi. Dalam uji impak Charpy atau Izod, spesimen dengan takik ditebang oleh palu pendulum, dan energi yang diserap untuk mematahkan spesimen

dicatat sebagai ukuran ketangguhan material. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch *dalam Materials Science and Engineering*: *An Introduction, "Impact tests measure a material's ability to absorb energy during fracture"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 170), yang menunjukkan pentingnya uji impak untuk menilai ketahanan material terhadap beban mendadak.

3.7.5 Uji Kekerasan

Uji kekerasan (hardness test) adalah metode pengujian sifat mekanik yang digunakan untuk mengukur resistensi permukaan material terhadap deformasi permanen, seperti goresan, lekukan, atau penetrasi. Uji ini penting untuk menilai kekuatan permukaan, ketahanan aus, dan kualitas perlakuan panas material, dan dilakukan dengan berbagai metode, seperti Brinell, Rockwell, dan Vickers, sesuai jenis material dan tujuan pengujian. Menurut William D. Callister Jr. dan David G. Rethwisch dalam *Materials Science and Engineering: An Introduction, "Hardness tests are used to characterize the resistance of a material to localized plastic deformation"* (Callister & Rethwisch, 2018, hlm. 172), yang menegaskan bahwa uji kekerasan menjadi indikator penting dari sifat mekanik permukaan material. Pengujian dilakukan sesuai standar seperti ASTM dan SNI.

BAB 4
SIFAT TERMAL MATERIAL

Sifat termal material adalah karakteristik pada suatu material yang sangat terkait dengan kemampuan merespon perubahan temperatur atau proses perpindahan panas. Sifat termal material menjadi faktor penentu kemampuan material pada saat kondisi temperatur rendah atau tinggi. Perlakuan termal pada material tidak hanya merubah kekuatan tarik saja, tetapi juga deformasi, sehingga mempengaruhi elastisitasnya (Aprillian, 2017).

Parameter utama sifat termal yang sering menjadi perhatian, karena berhubungan erat dengan performa material adalah sebagai berikut:

a. Ekspansi termal material, yaitu berubahnya ukuran/dimensi sebagai akibat dari perubahan temperatur suatu material.
b. Konduktivitas, yaitu kemampuan material untuk menghantarkan panas dari daerah yang bertemperatur tinggi menuju ke daerah bertemperatur rendah. Semakin besar nilai konduksi termal, maka kemampuan material untuk mengalirkan panas semakin mudah
c. Difusivitas termal, merupakan kemampuan suatu material untuk menghantarkan panas dengan cepat
d. Kalor jenis, merupakan jumlah energi panas yang di butuhkan untuk menaikkan temperatur 1 Kg material sebesar 1^0C

e. Ketahanan termal kejut, merupakan kemampuan untuk bertahannya material terhadap perubahan temperatur secara mendadak

4.1 Dasar Dasar Perpindahan Panas

perpindahan panas pada material logam merupakan proses yang sangat di butuhkan sebagai contoh mesin diesel yang ketika sedang beroperasi akan menimbulkan panas dan membutuhkan sistem pendingin agar tidak terjadi panas berlebih pada komponen-komponen mesin dan harus di tanggulangi dengan menggunakan radiator sebagai komponen yang membantu menurunkan panas pada block mesin dan komponen lainnya. Berdasarkan jenisnya perpindahan panas terbagi menjadi 3 macam:

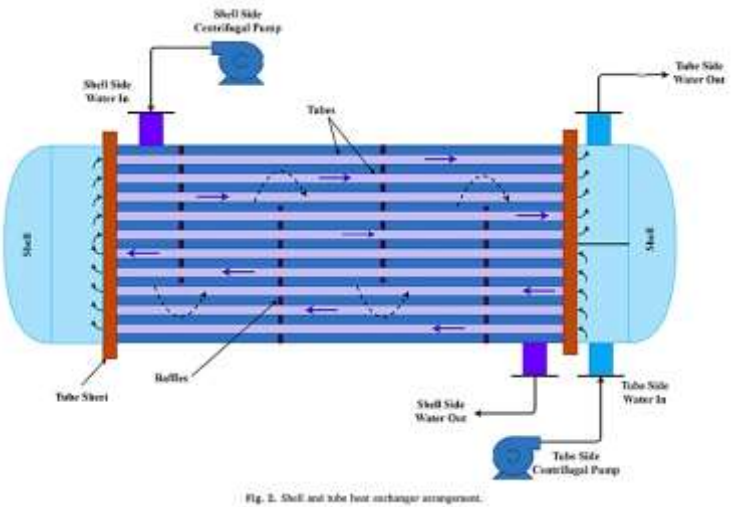
4.1.1 Konduksi Termal

Konduktivitas termal adalah kemampuan material untuk menghantarkan panas dari bagian yang memiliki temperatur tinggi ke bagian yang bertemperatur rendah berikut ini beberapa faktor yang mempengaruhi

a. Porositas
b. Struktur atom
c. Kelembapan material
d. Temperatur

4.1.2 Konveksi Termal

Konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi pada permukaan material padat dengan fluida yang bergerak. Sebagai contoh, radiator mobil dan heat exchanger.



Gambar 4. 1 *Heat Exchanger*

Sumber: Prajapati, dkk 2024

Hukum dasar yang di gunakan adalah hukum pendingin Newton:

$$A = hA(T_s - T_\infty)$$

Dimana:

H = Koefisien perpindahan panas ($W/m^2.K$)

A = Luas Permukaan (m^2)

T_s = Suhu permukaan (K)

T_∞= Suhu fluida (K)

4.1.3 Radiasi Termal

Radiasi termal adalah energi dari sebuah benda yang berupa gelombang elektromagnetik akibat perubahan struktur elektron penyusun.

Hukum dasar yang di gunakan adalah hukum stefan-Boltzmann, dengan persamaan rumus sebagai berikut:

$$Eb = \sigma\, AT^4$$

dimana:

E_b = daya emisi benda (W/m^2)

σ = Konstanta Stefan Boltzman ($5{,}67x10\text{-}8\ W/m^2.K^4$)

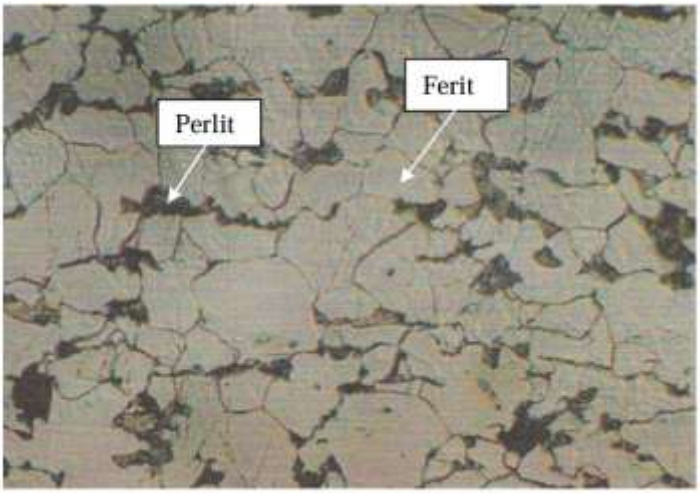
T =Temperatur (K)

A = Luas Permukaan (m^2)

4.2 Sifat-Sifat Termal Material

4.2.1 Sifat Termal Material Logam

Logam memiliki struktur ikatan kristal metalik yang kuat, dimana elekton dapat bergerak bebas. Oleh karena itu logam memiliki sifat termal yang handal. Logam adalah material konduktor panas yang sangat baik, dengan konduktivitas termal yang tinggi berkisar 15 W/m.K. sebagai contoh material logam adalah tembaga, baja, alminium.



Gambar 4. 2 Struktur Mikro Material Logam

Sumber: Santoso, H, 2017

Material logam tersusun dari fasa ferit dan perlit. Perlakuan termal pada material logam ini dapat mempengaruhi komposisi fasa ferit dan perlit yang mengakibatkan kekuatan dari materil logam menjadi berubah

Pada material logam, energi termal di rambatkan dengan 2 mekanisme

a. Migrasi elektron bebas, yaitu elektron ber valensi bergerak bebas melewati kisi kristal dengan membawa energi kinetik termal
b. Vibrasi kisi, yaitu tumbukan dari getaran atom-atom di dalam struktur kristal

Konduktifitas listrik dan konduktifitas termal karena pengaruh elektron bebas, maka kedua sifat material loga ini saling berkaitan secara linier berdasarkan suhu tertentu. Hal ini dapat dinyatakan dengan hukum Eiedemann-Frans sebagai berikut:

$$\frac{k}{\sigma} = L.T$$

Dimana:

T = Temperatur absolut (K)

L = Bilangan Lorenz ($W.\Omega.K^{-2}$)

Σ = Konduktifitas listrik ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)

K = konduktifitas termal (W/m.K)

Karakteristik material logam:

a. Tahan temperatur tinggi
b. Konduktivitas tinggi
c. Difusivitas tinggi

4.2.2 Sifat Termal Material Keramik

Keramik merupakan material non logam yang di proses pada temperatur yang tinggi, sehingga membentuk material padat yang kuat pada temperatur tinggi dan kestabilan struktur kimia yang baik, sebagai contoh Zirconis, Silika dan Alumina. Keramik memiliki koefisien ekspansi termal lebih kecil dibandingkan logam (Malik, dkk 2023)

Keramik memiliki kemampuan sebagai isolator panas, karena memiliki konduktifitas yang rendah.

Karakteristik keramik adalah:

a. Koefisien muai rendah
b. Deformasi saat di panaskan kecil
c. Ketahanan pada temperatur tinggi sangat baik
d. Isolator panas yang baik

Keramik memiliki kestabilan termal sangat baik, hal ini di karenakan keramik memiliki kelebihan:

a. Ikatan atom yang kuat
b. Tahan oksidasi
c. Titik lebur tinggi
d. Tahan korosi
e. Tahan aus

Selain kelebihannya, keramik juga memiliki kelemahan, ayaitu:

a. Sulit di lakukan proses permesinan
b. Ketahanan tarik rendah
c. Getas dan sensitif retakan

4.2.3 Sifat Termal Material Polimer

Polimer merupakan material yang banyak di gunakan pada dunia industri, karena memiliki sifat mudah pembentukan, ringan dan tahan korosi.

Jika polimer di panaskan pada suhu tertentu, maka akan terjadi perubahan struktur molekul secara signifikan. Ketika energ termal di berikan pada polimer maka akan terjadi pemutusan ikatan kovalen permanen pada rantai utama

Polimer memiliki karakteristik sebagai berikut:

a. Konduktifitas rendah
b. Memiliki bobot yang ringan
c. Mampu menahan panas

Kekurangan dari material polimer adalah:

a. Tidak tahan panas yang tinggi
b. Perubahan bentuk
c. Material komposit

4.2.4 Sifat Terman Material Komposit

Material komposit merupakan material yang sangat krusial dan banyak di gunakan pada manufaktur dan pesawat terbang. Material komposit di hasilkan dari penggabungan 2 material penyusun yang berbeda fase, sebagai contoh: polimer di kombinasikan dengan serat.

Ketika komposit mengalami penurunan temperatur pada prosesnya, akan terjadi penyusutan signifikan pada matriks (contoh polimer) di bandingkan dengan serat, sedangkan serat akan mempertahankan penyusutan yang terjadi. Dengan perpaduan jenis fase ini maka akan terciptalah material komposit yang memiliki tegangan tarik dan tegangan tekan.

Kelebihan komposit

a. Memiliki masa yang ringan
b. Mampu menahan panas
c. Memiliki ketahanan tarik dan terhadap beban

Pengaplikasian komposit dan bahkan perpaduan dengan polimer banyak di gunakan pada komponen-komponen mesin industri dan otomotif. Bahkan material ini juga banyak di gunakan pada pembuatan blade/sudu-sudu turbin angin seperti pada gambar 1.



Gambar 4. 3 Turbin Angin

Sumber: Penulis

Blade/sudu-sudu turbin yang terbuat dari material komposit berfungsi untuk menangkap energi angin yang mampu menahan dengan berbagai kecepatan tekanan angin

4.3 Metode Pengujian Sifat Termal Material

Untuk mengetahui kemampuan material komposit yang telah di buat, maka di lakukanlah pengujian instrumen termal sebagai berikut:

1. Metode pengujian *Laser Flash Analisis*(LFA)

   Pengujian ini menggunakan sampel uji berbentuk cakram tipis yang di kondikan pada temperatur tertentu, sisi kemudian depan sampel uji di tembakkan laser, sampel akan menyerap energi tersebut, kemudian terjadi perambatan ke sisi belakang. Kenaikan temperatur pada sisi belakang sampel di ukur dengan menggunakan detektor infrared (IR) secata kontinu. Hasil pengujian ini akan menampilkan grafik thermogram kenaikan suhu berbanding dengan waktu. Selama pengujian permukaan depan spesimen bidang paralel dipanaskan oleh sinar laser atau cahaya berdurasi singkat. Kenaikan suhu yang dihasilkan pada permukaan belakang spesimen diukur terhadap waktu. Dengan mengevaluasi kenaikan suhu ini, difusivitas termal bahan dapat ditentukan tanpa memerlukan kalibrasi sensor (Blumm, 2025)

2. *Diffserensial scanning calorimetry* (DSC)

   Diffserensial scanning calorimetry adalah pengujian termal dengan cara mengukur perbedaan laju panas antara sampel uji dengan referensi inert. DSC memungkinkan penentuan suhu leleh, kristalisasi, dan transisi mesomorfik, serta perubahan entalpi dan entropi yang terkait, serta karakterisasi transisi kaca dan efek-efek lain yang menunjukkan perubahan kapasitas panas atau kalor laten (Schick, C, 2009).

   Prinsip kerja dari pengujian ini adalah sampel uji di masukkan pada wadah dan material inert di masukkan pada wadah lain sebagai referensi. Kedua wadah tersebut di letakkan pada alat sensor termoelektrik terpisah di ruang furnance. Furnance di panaskan dengan temperatur tertentu dengan pelindung gas nitrogen. Ketika sampel mengalami perubaan fisik, sampel menyerap atau melepaskan panas dengan cara penambahan atau pengurangan kalor secara otomatis.

3. *Thermogravimetrik Analysis* (TGA)

Thermogravimetrik Analysis adalah pengujian kuantitatif yang mengukur perubahan masa sampel uji secara terus-menerus dengan kenaikan temperatur. Peralatan analisis termogravimetri (TGA) seperti berbagai jenis timbangan, cawan pembakar, dan tungku, instrumen TGA canggih yang digunakan mampu untuk menganalisis gas yang dihasilkan dan penerapannya dalam memprediksi mekanisme dekomposisi termal nanokomposit polimer, studi adsorpsi gas, kekuatan relatif katalis, serta analisis kinetika degradasi termal untuk nanokomposit polimer (Loganathan, dkk 2017)

BAB 5

SIFAT ELEKTRIK DAN MAGNETIK MATERIAL

5.1 Klasifikasi Material

Sifat elektrik dan magnetik merupakan parameter fundamental dalam menentukan kinerja material teknik, khususnya pada sistem yang melibatkan transfer energi, pemrosesan sinyal, dan penyimpanan informasi. Dalam perspektif rekayasa material, kemampuan suatu material untuk menghantarkan arus listrik, merespons medan listrik, atau berinteraksi dengan medan magnet bukanlah sifat yang berdiri sendiri, melainkan konsekuensi langsung dari struktur internalnya pada skala atomik dan elektronik. Oleh karena itu, pemahaman terhadap sifat ini tidak dapat dilepaskan dari konfigurasi elektron, jenis ikatan atom, serta keteraturan struktur kristal.

Secara atomik, perilaku elektrik material ditentukan oleh distribusi elektron dalam tingkat energi yang kemudian membentuk pita energi dalam padatan. Interaksi antar atom menyebabkan tingkat energi diskrit melebar menjadi pita valensi dan pita konduksi, yang dipisahkan oleh celah energi (*band gap*). Besar kecilnya celah energi ini menjadi faktor penentu apakah suatu material bersifat konduktor, semikonduktor, atau isolator. Pada material konduktor, seperti logam, pita valensi dan pita konduksi saling tumpang

tindih sehingga elektron dapat bergerak bebas di bawah pengaruh medan listrik. Sebaliknya, pada isolator, celah energi yang besar menghambat perpindahan elektron, sedangkan semikonduktor memiliki celah energi menengah yang memungkinkan pengaturan konduktivitas melalui temperatur atau doping(Ashby, Shercliff dan Cebon, 2018). Pada Gambar 5.1 diberikan diagram dari sifat listrik material.



Gambar 5. 1 Sifat Kelistrikan Beserta Contoh Materialnya

Sementara itu, sifat magnetik material berakar pada momen magnetik yang berasal dari spin dan gerak orbital elektron. Interaksi antar momen magnetik dalam struktur kristal menghasilkan berbagai perilaku magnetik, seperti diamagnetisme, paramagnetisme, dan feromagnetisme. Pada material feromagnetik, misalnya, terdapat keteraturan orientasi spin dalam domain-domain magnetik yang memungkinkan material tersebut mempertahankan magnetisasi bahkan setelah medan eksternal dihilangkan. Fenomena ini sangat penting dalam aplikasi penyimpanan data dan perangkat elektromagnetik. Pada Gambar 5.2

diberikan klasifikasi material berdasarkan respons magnetiknya.



Gambar 5. 2 Klasifikasi Material Berdasarkan Respons Magnetik

Dalam praktik rekayasa, sifat elektrik dan magnetik dimanfaatkan secara luas dalam berbagai aplikasi. Material konduktor, seperti tembaga dan aluminium, digunakan dalam sistem transmisi listrik karena memiliki konduktivitas tinggi dan rugi energi yang rendah. Material semikonduktor, seperti silikon, menjadi tulang punggung industri elektronika modern, digunakan dalam pembuatan dioda, transistor, dan sirkuit terpadu. Di sisi lain, material magnetik, baik yang bersifat lunak maupun keras, digunakan dalam transformator, motor listrik, generator, serta perangkat penyimpanan magnetik. Material magnet lunak dipilih karena memiliki kerugian histeresis yang rendah, sedangkan material magnet keras digunakan sebagai magnet permanen dengan koersivitas tinggi.

Dengan demikian, studi mengenai sifat elektrik dan magnetik material tidak hanya bersifat teoritis, tetapi memiliki implikasi langsung terhadap desain dan optimasi sistem teknik. Pemahaman yang komprehensif terhadap hubungan antara struktur atomik dan respons makroskopik material memungkinkan rekayasa material yang lebih efisien, fungsional, dan adaptif terhadap kebutuhan teknologi modern (Callister dan Rethwisch, 2020).

5.2 Sifat dan Konduksi Elektrik

Sifat elektrik material merupakan salah satu karakteristik fundamental yang menentukan kemampuan suatu material dalam menghantarkan arus listrik. Dalam bidang material teknik, pemahaman mengenai perilaku listrik sangat penting karena hampir seluruh sistem teknologi modern memanfaatkan aliran elektron, mulai dari sistem tenaga listrik, perangkat elektronik, sensor, telekomunikasi, hingga teknologi energi terbarukan. Respons suatu material terhadap medan listrik dipengaruhi oleh struktur atom, konfigurasi elektron, ikatan antaratom, serta keberadaan pembawa muatan bebas di dalam material tersebut (Hummel, 2011).

Konduksi listrik terjadi akibat pergerakan muatan listrik ketika material diberi beda potensial. Muatan tersebut dapat berupa elektron bebas, hole, maupun ion tergantung jenis material dan kondisi lingkungannya. Material dengan jumlah pembawa muatan bebas yang tinggi umumnya memiliki kemampuan hantaran listrik yang baik, sedangkan material dengan pembawa muatan terbatas cenderung bersifat isolatif. Berdasarkan kemampuan menghantarkan listrik, material secara umum dapat diklasifikasikan menjadi konduktor, semikonduktor, dan isolator.

Kajian mengenai sifat dan konduksi elektrik menjadi dasar penting dalam pemilihan material teknik. Konduktor digunakan pada sistem penghantar listrik dan rangkaian elektronik, semikonduktor digunakan dalam komponen aktif seperti transistor dan dioda, sedangkan isolator digunakan untuk mencegah kebocoran arus listrik dan melindungi sistem kelistrikan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai arus listrik, hukum Ohm, konduktivitas, resistivitas, dan mekanisme konduksi elektrik sangat diperlukan dalam ilmu material dan rekayasa teknik (Callister dan Rethwisch, 2020).

5.2.1 Arus Listrik dan Hukum Ohm

Arus listrik merupakan aliran muatan listrik yang bergerak melalui suatu medium akibat adanya beda potensial listrik. Dalam material padat, arus listrik umumnya dihasilkan oleh pergerakan elektron bebas. Ketika suatu material dihubungkan dengan sumber tegangan, medan listrik yang terbentuk akan menyebabkan elektron bergerak dari potensial rendah menuju potensial tinggi secara kolektif sehingga menghasilkan arus listrik. Secara matematis, arus listrik yang mengalir dituliskan sebagai,

$$I = \frac{Q}{t} \tag{1}$$

dengan I adalah arus listrik (A; amper), Q adalah jumlah muatan listrik (C; coulomb) dan t adalah waktu (s; detik). Arus listrik dipengaruhi oleh jumlah muatan yang bergerak dan kecepatan perpindahan muatan tersebut. Pada konduktor logam, elektron valensi dapat bergerak relatif bebas di dalam kisi kristal sehingga menghasilkan arus yang cukup besar. Sebaliknya, pada isolator, elektron terikat kuat pada atom sehingga pergerakan muatan sangat terbatas.

Hubungan antara arus listrik dan beda potensial dijelaskan oleh hukum Ohm. Hukum ini dikemukakan oleh Georg Simon Ohm pada tahun 1827 dan menjadi dasar utama dalam analisis rangkaian listrik. Hukum Ohm menyatakan bahwa besar arus listrik yang mengalir melalui suatu penghantar sebanding dengan beda potensial yang diberikan dan berbanding terbalik dengan hambatan listrik penghantar tersebut (Callister dan Rethwisch, 2020) yang perumusannya dituliskan sebagai,

$$V = IR \quad (2)$$

dengan V adalah tegangan listrik (V; volt) dan R adalah hambatan listrik (Ω; ohm). Persamaan (2) tersebut menunjukkan bahwa jika hambatan suatu material tetap, maka peningkatan tegangan akan meningkatkan arus listrik secara linier. Material yang mematuhi hubungan linier ini disebut material ohmik. Sebagian besar logam pada kondisi temperatur tertentu menunjukkan perilaku ohmik. Namun, beberapa material seperti dioda semikonduktor dan material nonlinier lainnya tidak mengikuti hukum Ohm secara sempurna. Hambatan listrik dipengaruhi oleh dimensi geometrik material dan sifat intrinsik material itu sendiri. Semakin panjang penghantar, hambatan listrik akan semakin besar karena elektron mengalami lebih banyak tumbukan selama bergerak. Sebaliknya, semakin besar luas penampang penghantar, hambatan akan semakin kecil karena tersedia jalur pergerakan elektron yang lebih luas.

Selain faktor geometrik, temperatur juga sangat mempengaruhi konduksi listrik. Pada logam, kenaikan temperatur meningkatkan getaran atom dalam kisi kristal sehingga tumbukan elektron menjadi lebih sering dan hambatan meningkat. Oleh sebab itu, resistansi logam umumnya meningkat seiring kenaikan temperatur. Pada semikonduktor, fenomena yang terjadi justru sebaliknya, yaitu peningkatan temperatur dapat meningkatkan jumlah pembawa muatan sehingga konduktivitas meningkat. Fenomena ini menyebabkan resistivitas logam meningkat hampir linier terhadap temperatur dalam rentang tertentu (Callister dan Rethwisch, 2022). Hubungan resistivitas terhadap temperatur dapat dituliskan sebagai,

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3)$$

dengan ρ adalah resistivitas pada temperatur akhir T, ρ_0 adalah resistivitas awal pada temperatur referensi T_0 dan α adalah koefisien temperatur resistivitas. Fenomena penurunan konduktivitas pada temperatur tinggi sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Kabel penghantar yang mengalami pemanasan berlebih akan memiliki hambatan lebih besar sehingga rugi-rugi daya meningkat. Oleh karena itu, sistem pendinginan dan pemilihan material penghantar menjadi faktor penting dalam rekayasa kelistrikan. Dalam aplikasi teknik, hukum Ohm digunakan secara luas untuk merancang sistem kelistrikan, menentukan spesifikasi penghantar, menghitung konsumsi daya, serta menganalisis performa komponen elektronik. Pemahaman terhadap hubungan arus, tegangan, dan hambatan menjadi dasar dalam pengembangan teknologi elektronik modern.

5.2.2 Konduktivitas dan Resistivitas

Kemampuan suatu material dalam menghantarkan arus listrik dinyatakan melalui parameter konduktivitas listrik dan resistivitas listrik. Kedua parameter ini merupakan sifat intrinsik material yang sangat penting dalam karakterisasi material elektrik. Resistivitas adalah ukuran hambatan internal suatu material terhadap aliran arus Listrik (Callister dan Rethwisch, 2022). Resistivitas menunjukkan seberapa kuat material menghambat pergerakan elektron di dalamnya. Secara matematis, resistivitas dinyatakan sebagai,

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (4)$$

dengan ρ adalah resistivitas (Ω.m), A adalah luas penampang penghantar (m^2) dan L adalah panjang penghantar (m). Nilai resistivitas yang kecil menunjukkan bahwa material mudah menghantarkan listrik, sedangkan resistivitas besar menunjukkan sifat isolatif. Logam seperti tembaga dan perak memiliki resistivitas sangat rendah sehingga banyak digunakan sebagai penghantar listrik. Sebaliknya, keramik dan polimer umumnya memiliki resistivitas tinggi sehingga digunakan sebagai isolator. Konduktivitas listrik (σ) merupakan kebalikan dari resistivitas dan menyatakan kemampuan material dalam menghantarkan arus Listrik (Callister dan Rethwisch, 2022). Hubungan keduanya dinyatakan sebagai,

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{5}$$

Semakin tinggi nilai konduktivitas, semakin mudah elektron bergerak di dalam material. Konduktivitas dipengaruhi oleh jumlah pembawa muatan dan mobilitas pembawa muatan tersebut. Dalam logam, konduktivitas tinggi dihasilkan oleh keberadaan elektron bebas dalam jumlah besar. Pada semikonduktor, konduktivitas dapat diatur melalui doping atau perubahan temperatur.

Berdasarkan nilai konduktivitasnya, konduktor memiliki konduktivitas tinggi karena banyak elektron bebas tersedia untuk menghantarkan listrik. Semikonduktor memiliki konduktivitas menengah yang sangat dipengaruhi oleh temperatur dan impuritas. Isolator memiliki konduktivitas sangat rendah karena hampir tidak terdapat pembawa muatan bebas. Selain temperatur, konduktivitas juga dipengaruhi oleh struktur mikro material. Keberadaan cacat kristal, batas butir, dislokasi, dan impuritas dapat menghambat

pergerakan elektron sehingga menurunkan konduktivitas. Pada material polikristalin, elektron sering mengalami hambatan saat melewati batas butir. Oleh karena itu, kualitas struktur kristal sangat mempengaruhi performa elektrik material. Dalam teknologi modern, pengendalian konduktivitas material menjadi aspek yang sangat penting. Industri elektronik memanfaatkan material dengan rentang konduktivitas tertentu untuk menghasilkan fungsi spesifik. Tembaga digunakan sebagai penghantar karena konduktivitasnya tinggi, silikon digunakan sebagai semikonduktor karena sifat elektriknya dapat dikontrol, sedangkan polimer dan keramik digunakan sebagai isolator untuk keamanan sistem kelistrikan.

5.2.3 Mekanisme Konduksi

Mekanisme konduksi listrik pada material berkaitan erat dengan struktur pita energi dan keberadaan pembawa muatan. Berdasarkan mekanisme ini, material dapat dibedakan menjadi logam, semikonduktor, dan isolator.

Logam merupakan material dengan konduktivitas listrik sangat tinggi. Hal ini disebabkan oleh adanya elektron bebas yang dapat bergerak dengan mudah di dalam kisi kristal logam. Dalam teori pita energi, pita valensi dan pita konduksi pada logam saling tumpang tindih sehingga elektron dapat berpindah tanpa memerlukan energi tambahan yang besar (Kittel, 2005). Ketika medan listrik diberikan, elektron bebas bergerak secara terarah membentuk arus listrik. Walaupun elektron mengalami tumbukan dengan atom dan cacat kristal, jumlah elektron bebas yang sangat besar menyebabkan logam tetap memiliki konduktivitas tinggi. Konduktivitas logam dipengaruhi oleh temperatur. Pada temperatur tinggi, getaran termal

atom meningkat sehingga elektron lebih sering bertumbukan dan hambatan listrik meningkat. Oleh karena itu, resistivitas logam bertambah seiring kenaikan temperatur. Logam yang umum digunakan sebagai penghantar listrik Adalah tembaga (Cu), perak (Ag), aluminium (Al), dan emas (Au). Tembaga banyak digunakan karena memiliki kombinasi konduktivitas tinggi, harga relatif ekonomis, dan ketahanan korosi yang baik. Aluminium banyak digunakan pada sistem transmisi daya karena massa jenisnya ringan.

Semikonduktor memiliki sifat elektrik yang berada di antara konduktor dan isolator. Material ini memiliki celah energi (*band gap*) kecil antara pita valensi dan pita konduksi sehingga sebagian elektron dapat berpindah ke pita konduksi ketika memperoleh energi termal. Pada temperatur rendah, semikonduktor memiliki konduktivitas rendah. Namun, ketika temperatur meningkat, semakin banyak elektron memperoleh energi untuk melompati *band gap* sehingga jumlah pembawa muatan meningkat dan konduktivitas bertambah. Konduksi pada semikonduktor melibatkan dua jenis pembawa muatan elektron bebas dan *hole*.

Hole merupakan kekosongan elektron pada pita valensi yang berperilaku seperti muatan positif. Pergerakan hole juga berkontribusi terhadap aliran arus listrik. Semikonduktor dapat dimodifikasi melalui proses doping, yaitu penambahan impuritas tertentu untuk meningkatkan jumlah pembawa muatan. Berdasarkan jenis dopingnya, semikonduktor dibagi menjadi, Semikonduktor tipe-n yang memiliki elektron sebagai pembawa mayoritas, dan Semikonduktor tipe-p yang memiliki hole sebagai pembawa mayoritas. Material semikonduktor yang paling umum digunakan adalah silikon (Si) dan germanium (Ge). Silikon mendominasi industri elektronik karena stabilitas termal dan

kemudahan fabrikasinya. Perkembangan teknologi digital modern sangat bergantung pada penguasaan sifat elektrik material semikonduktor.

Isolator merupakan material yang sangat sulit menghantarkan arus listrik karena hampir tidak memiliki pembawa muatan bebas. Dalam teori pita energi, isolator memiliki band gap yang sangat besar sehingga elektron pada pita valensi memerlukan energi sangat tinggi untuk berpindah ke pita konduksi. Akibatnya, pada kondisi normal elektron tetap terikat kuat pada atom dan tidak dapat bergerak bebas. Oleh karena itu, arus listrik yang mengalir pada isolator sangat kecil. Material isolator digunakan untuk mencegah kebocoran arus dan melindungi sistem kelistrikan dari hubungan singkat. Sifat isolatif dipengaruhi oleh struktur ikatan atom yang kuat dan tidak adanya elektron bebas. Walaupun bersifat isolatif, pada medan listrik sangat tinggi beberapa isolator dapat mengalami *breakdown* listrik, yaitu kondisi ketika elektron memperoleh energi cukup untuk menjadi pembawa muatan bebas sehingga material mulai menghantarkan listrik. Fenomena ini penting diperhatikan dalam desain sistem tegangan tinggi.

Pemahaman mengenai mekanisme konduksi listrik pada logam, semikonduktor, dan isolator menjadi dasar utama dalam pengembangan material elektronik modern. Dengan mengontrol struktur atom, komposisi kimia, dan mikrostruktur material, sifat elektrik dapat direkayasa sesuai kebutuhan aplikasi teknik tertentu. Secara ilustratif mekanisme konduksi diberikan pada Gambar 5.3.



Gambar 5. 3Mekanisme Konduksi

5.3 Sifat Magnetik Material

Sifat magnetik material merupakan respons suatu bahan terhadap medan magnet eksternal yang dipengaruhi oleh konfigurasi elektron, momen magnet atomik, serta interaksi spin antar atom di dalam material. Fenomena magnetisme berasal dari gerakan elektron, baik akibat orbit elektron mengelilingi inti maupun akibat spin intrinsik elektron. Berdasarkan cara atom dan momen magnetiknya berinteraksi, material dapat diklasifikasikan menjadi diamagnetik, paramagnetik, ferromagnetik, antiferromagnetik, dan ferrimagnetik. Setiap jenis memiliki karakteristik unik yang menentukan perilakunya terhadap medan magnet dan aplikasinya dalam teknologi.

5.3.1 Diamagnetik

Material diamagnetik adalah material yang memiliki kecenderungan lemah untuk menolak medan magnet eksternal. Sifat ini muncul karena seluruh elektron dalam atom berpasangan sehingga resultan

momen magnet atomiknya bernilai nol. Ketika medan magnet luar diberikan, gerakan orbital elektron mengalami perubahan kecil yang menghasilkan medan magnet induksi berlawanan arah dengan medan magnet eksternal. Akibatnya, material diamagnetik mengalami gaya tolak yang sangat lemah terhadap magnet. Sifat diamagnetik dimiliki oleh hampir semua material, namun pada beberapa bahan efek ini tertutupi oleh sifat magnetik lain yang lebih kuat seperti paramagnetik atau ferromagnetik. Nilai suseptibilitas magnetik material diamagnetik bernilai negatif dan sangat kecil. Karena efeknya lemah, material diamagnetik biasanya tidak dapat mempertahankan magnetisasi setelah medan magnet dihilangkan.

Contoh material diamagnetik antara lain bismut, tembaga, emas, perak, silikon, air, dan grafit. Pada grafit, efek diamagnetik dapat diamati cukup kuat akibat struktur elektron pada bidang karbonnya. Dalam teknologi, sifat diamagnetik dimanfaatkan pada sistem levitasi magnetik tertentu, terutama menggunakan material superkonduktor yang menunjukkan diamagnetisme sempurna melalui efek Meissner.

Selain itu, material diamagnetik memiliki ketergantungan yang sangat kecil terhadap temperatur karena tidak terdapat momen magnet permanen yang harus disejajarkan. Oleh sebab itu, perubahan suhu tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap respons magnetiknya. Secara umum, diamagnetisme merupakan bentuk magnetisme paling dasar yang berasal dari interaksi elektron terhadap medan magnet luar.

5.3.2 Paramagnetik

Material paramagnetik adalah material yang memiliki elektron tidak berpasangan sehingga setiap atom memiliki momen magnet permanen kecil. Dalam kondisi tanpa medan magnet eksternal, arah momen magnet atomik tersusun acak sehingga resultan magnetisasinya mendekati nol. Namun, ketika medan magnet diberikan, sebagian momen magnet akan cenderung sejajar dengan arah medan sehingga material tertarik lemah oleh magnet. Sifat paramagnetik ditandai dengan nilai suseptibilitas magnetik positif tetapi kecil. Karena gaya tariknya lemah, material paramagnetik tidak dapat menjadi magnet permanen. Setelah medan magnet dihilangkan, orientasi momen magnet kembali acak akibat agitasi termal sehingga magnetisasi hilang. Besarnya magnetisasi material paramagnetik sangat dipengaruhi oleh temperatur. Semakin tinggi temperatur, gerakan termal atom semakin besar sehingga orientasi momen magnet menjadi lebih acak. Hubungan ini dijelaskan melalui hukum Curie, yaitu magnetisasi berbanding terbalik dengan temperatur absolut.

Contoh material paramagnetik meliputi aluminium, magnesium, platinum, titanium, dan oksigen cair. Pada unsur-unsur tersebut terdapat elektron tidak berpasangan yang menghasilkan momen magnetik atomik. Dalam bidang teknik, sifat paramagnetik digunakan pada teknologi pencitraan resonansi magnetik atau *Magnetic Resonance Imaging* (MRI), karena beberapa ion paramagnetik dapat meningkatkan kontras pencitraan.

Material paramagnetik memiliki respons magnetik lebih kuat dibandingkan diamagnetik, namun jauh lebih lemah dibandingkan ferromagnetik. Fenomena ini

penting dalam memahami transisi sifat magnetik material serta hubungan antara struktur elektron dan perilaku magnetiknya.

5.3.3 Ferromagnetik

Material ferromagnetik merupakan material yang memiliki sifat magnetik sangat kuat akibat adanya interaksi antar momen magnet atomik yang menyebabkan spin-spin elektron sejajar secara spontan (Cullity dan Graham, 2009). Interaksi ini dikenal sebagai interaksi pertukaran (*exchange interaction*). Akibat penyelarasan tersebut, terbentuk daerah-daerah kecil yang disebut domain magnetik, di mana momen magnet dalam satu domain memiliki arah yang sama. Ketika medan magnet eksternal diberikan, domain-domain magnetik akan tumbuh dan sejajar mengikuti arah medan sehingga menghasilkan magnetisasi yang sangat besar. Bahkan setelah medan magnet dihilangkan, sebagian orientasi domain tetap bertahan sehingga material masih memiliki magnetisasi permanen. Fenomena ini disebut remanensi. Material ferromagnetik memiliki suseptibilitas magnetik sangat besar dan menunjukkan kurva histeresis. Kurva ini menggambarkan hubungan antara medan magnet dan magnetisasi material. Sifat histeresis sangat penting dalam aplikasi penyimpanan data magnetik, transformator, dan motor listrik.

Contoh material ferromagnetik meliputi besi, nikel, kobalt, dan beberapa paduannya seperti baja silikon dan alnico. Material tersebut banyak digunakan dalam industri kelistrikan dan elektronika karena kemampuannya memperkuat medan magnet.

Sifat ferromagnetik sangat dipengaruhi oleh temperatur. Jika suhu dinaikkan hingga mencapai temperatur Curie, energi termal akan mengacaukan keteraturan spin sehingga material kehilangan sifat ferromagnetiknya dan berubah menjadi paramagnetik. Oleh karena itu, pengendalian temperatur menjadi faktor penting dalam aplikasi material magnetik. Ferromagnetisme merupakan dasar dari banyak teknologi modern seperti *hard disk*, generator listrik, transformator, speaker, dan perangkat elektromagnetik lainnya. Kekuatan magnetiknya yang tinggi menjadikan material ini sangat penting dalam rekayasa material teknik.

5.3.4 Antiferromagnetik

Material antiferromagnetik adalah material yang memiliki momen magnet atomik tersusun antiparalel secara teratur sehingga resultan magnetisasinya mendekati nol. Berbeda dengan ferromagnetik yang memiliki spin sejajar, pada material antiferromagnetik spin elektron atom tetangga saling berlawanan arah dengan besar momen magnet yang sama. Penyusunan antiparalel ini terjadi akibat interaksi pertukaran negatif antar atom. Karena momen magnet saling meniadakan, material antiferromagnetik umumnya tidak menunjukkan magnetisasi makroskopik yang kuat meskipun secara internal memiliki keteraturan magnetik. Material antiferromagnetik memiliki temperatur karakteristik yang disebut temperatur Néel. Di bawah temperatur Néel, susunan antiparalel spin tetap stabil. Namun ketika temperatur melebihi nilai tersebut, energi termal mengganggu keteraturan spin sehingga material berubah menjadi paramagnetik.

Contoh material antiferromagnetik antara lain mangan oksida (MnO), nikel oksida (NiO), kromium, dan hematit pada kondisi tertentu. Dalam perkembangan teknologi modern, material antiferromagnetik menjadi perhatian penting dalam bidang spintronik karena memiliki stabilitas tinggi terhadap gangguan medan magnet eksternal.

Keunggulan material antiferromagnetik adalah tidak menghasilkan medan magnet luar yang kuat sehingga interferensi magnetik dapat diminimalkan. Selain itu, dinamika spin pada material ini dapat berlangsung sangat cepat sehingga potensial digunakan untuk perangkat penyimpanan data generasi baru. Walaupun magnetisasi totalnya hampir nol, studi mengenai antiferromagnetisme sangat penting dalam memahami mekanisme interaksi spin dan struktur kristal material. Fenomena ini juga membantu menjelaskan hubungan antara sifat magnetik dan susunan atomik dalam material padat.

5.3.5 Ferrimagnetik

Material ferrimagnetik memiliki susunan momen magnet atomik yang antiparalel seperti antiferromagnetik, tetapi besar momen magnet pada masing-masing subkisi tidak sama (Cullity dan Graham, 2009). Akibatnya, terjadi resultan magnetisasi total yang tidak nol sehingga material tetap menunjukkan sifat magnetik kuat. Fenomena ferrimagnetik banyak ditemukan pada material keramik magnetik yang disebut ferit. Dalam struktur ferit, ion-ion logam menempati posisi kristal berbeda sehingga menghasilkan momen magnet tidak seimbang. Walaupun arah spin sebagian atom berlawanan, ketidaksamaan besar momennya menyebabkan material tetap termagnetisasi.

Contoh material ferrimagnetik meliputi magnetit (Fe_3O_4), ferrite mangan-zink, ferrite nikel-zink, dan ferrite kobalt. Material ini banyak digunakan pada inti transformator frekuensi tinggi, antena, perangkat gelombang mikro, dan absorber gelombang elektromagnetik karena memiliki resistivitas listrik tinggi serta rugi arus eddy rendah.

Ferrimagnetik juga memiliki domain magnetik dan menunjukkan kurva histeresis seperti ferromagnetik. Namun, sifat listriknya umumnya lebih isolatif dibandingkan logam ferromagnetik. Hal ini menjadikan ferrite sangat sesuai untuk aplikasi frekuensi tinggi. Sama seperti ferromagnetik, material ferrimagnetik memiliki temperatur Curie. Ketika temperatur melampaui nilai tersebut, keteraturan spin rusak dan material berubah menjadi paramagnetik. Respons magnetik ferrimagnetik sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia, ukuran butir, dan struktur kristalnya. Dalam teknologi modern, material ferrimagnetik memiliki peranan penting pada sistem komunikasi, radar, perangkat telekomunikasi, dan material penyerap gelombang mikro. Kombinasi sifat magnetik dan resistivitas tinggi menjadikannya material strategis dalam pengembangan perangkat elektronik dan elektromagnetik.

Rangkuman sifat magnetik material diberikan oleh Gambar 5.4 berikut ini,



Gambar 5. 4 Sifat Magnetik Pada Material

5.3.6 Medan Magnetik pada Material

Medan magnetik pada material merupakan fenomena yang menggambarkan bagaimana suatu bahan merespons pengaruh medan magnet eksternal. Respons tersebut sangat dipengaruhi oleh struktur atom, konfigurasi elektron, interaksi spin elektron, serta domain magnetik di dalam material. Ketika suatu material ditempatkan dalam medan magnet luar, momen-momen magnetik atom di dalamnya akan mengalami orientasi tertentu sehingga menghasilkan magnetisasi. Besarnya respons magnetik berbeda untuk setiap jenis material, tergantung pada sifat magnetiknya seperti diamagnetik, paramagnetik, ferromagnetik, antiferromagnetik, atau ferrimagnetik.

Pada tingkat atomik, medan magnet muncul akibat gerakan elektron mengelilingi inti dan spin intrinsik elektron. Setiap elektron memiliki momen magnetik kecil yang dapat berinteraksi dengan medan magnet luar. Dalam material tertentu, momen magnetik antar

atom dapat saling menguatkan atau saling meniadakan. Oleh karena itu, perilaku magnetik material menjadi sangat bergantung pada susunan spin dan struktur kristalnya. Ketika medan magnet eksternal diberikan pada material, akan terjadi proses magnetisasi. Magnetisasi merupakan keadaan ketika momen-momen magnetik dalam material cenderung sejajar terhadap arah medan luar. Dalam material ferromagnetik, proses ini berlangsung melalui pergerakan domain-domain magnetik. Domain magnetik adalah wilayah kecil di dalam material yang memiliki arah magnetisasi seragam. Sebelum diberikan medan magnet, arah domain-domain tersebut acak sehingga magnetisasi total material kecil atau nol. Ketika medan magnet diterapkan, domain yang searah medan akan tumbuh lebih besar sehingga menghasilkan peningkatan magnetisasi total. Hubungan antara medan magnet luar dan respons magnetisasi material dinyatakan melalui parameter kuat medan magnet (H), induksi magnetik (B), dan magnetisasi (M) (Callister dan Rethwisch, 2022). Secara umum hubungan tersebut dapat dituliskan sebagai,

$$B = \mu_0(H + M) \tag{6}$$

dengan B adalah induksi magnetik (Tesla), μ_0 adalah permeabilitas vakum, H adalah kuat medan magnet luar (A/m) dan M adalah magnetisasi pada material (A/M). Pada material linear sederhana, magnetisasi berbanding lurus terhadap medan magnet luar,

$$M = \chi H \tag{7}$$

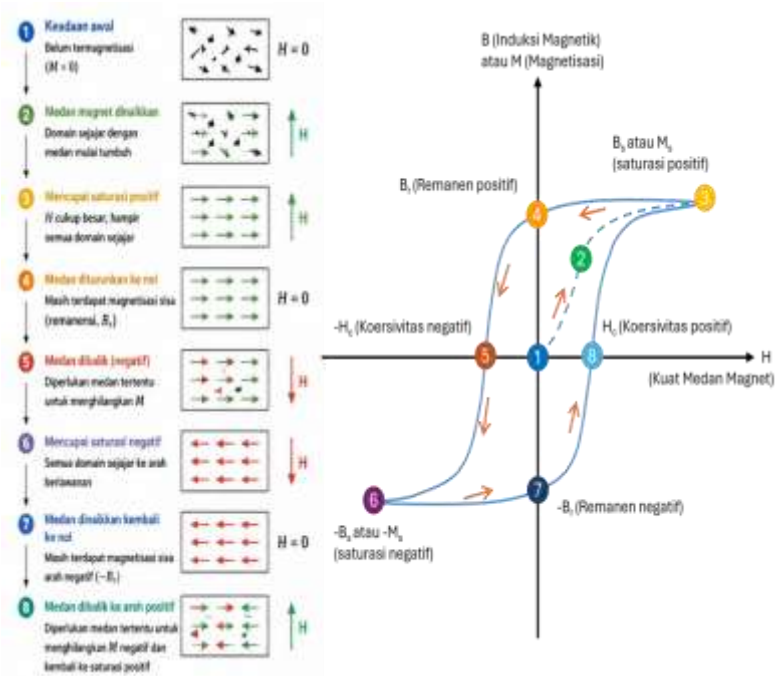
dengan χ adalah suseptibilitas magnetik material (Callister dan Rethwisch, 2022). Nilai suseptibilitas menunjukkan seberapa kuat material merespons medan magnet eksternal. Nilai positif menunjukkan sifat paramagnetik atau ferromagnetik, sedangkan nilai negatif menunjukkan diamagnetik. Respons paling signifikan terjadi pada material ferromagnetik dan ferrimagnetik. Dalam material ini, interaksi antar spin elektron menyebabkan terbentuknya domain magnetik yang dapat berubah orientasi secara kolektif. Ketika medan magnet meningkat, domain-domain yang sejajar dengan medan akan berkembang sehingga magnetisasi meningkat secara cepat hingga mencapai kondisi jenuh magnetik (*saturation*). Respons magnetik material dapat diukur menggunakan beberapa metode, seperti Vibrating Sample Magnetometer (VSM), SQUID Magnetometer, Gouy Balance, dan Faraday Balance. Di antara metode tersebut, VSM merupakan salah satu teknik paling umum untuk mengukur sifat magnetik material teknik. Prinsip kerja VSM didasarkan pada induksi elektromagnetik. Sampel ditempatkan dalam medan magnet eksternal kemudian digetarkan secara periodik. Getaran ini menghasilkan perubahan fluks magnetik pada kumparan pendeteksi sehingga timbul tegangan induksi yang sebanding dengan magnetisasi material. Dari pengukuran tersebut diperoleh hubungan antara medan magnet eksternal dan magnetisasi material yang kemudian diplot dalam bentuk kurva histeresis. Kurva ini menjadi parameter utama dalam karakterisasi material magnetik karena mampu memberikan informasi mengenai kekuatan magnetisasi, retentivitas, koersivitas, dan energi magnetik material.

5.3.7 Kurva Histeresis Magnetik

Kurva histeresis merupakan grafik hubungan antara medan magnet luar (H) dan induksi magnetik atau magnetisasi (B atau M). Kurva ini menunjukkan bahwa respons magnetik material tidak hanya bergantung pada medan magnet saat itu, tetapi juga dipengaruhi oleh riwayat magnetisasi sebelumnya. Pada awal pengukuran, material berada dalam kondisi belum termagnetisasi. Ketika medan magnet dinaikkan, magnetisasi meningkat hingga mencapai titik saturasi. Jika medan kemudian dikurangi kembali menjadi nol, material masih memiliki magnetisasi sisa yang disebut remanensi (B_r). Ketika medan magnet dibalik arahnya, diperlukan medan tertentu untuk menghilangkan magnetisasi sisa tersebut. Medan ini disebut koersivitas (H_c). Setelah itu material akan termagnetisasi ke arah berlawanan hingga mencapai saturasi negatif. Jika siklus diteruskan, terbentuklah loop tertutup yang disebut loop histeresis.

Secara umum bentuk kurva histeresis diilustrasikan pada Gambar 5.5 yang penjelasannya sebagai berikut,

- Daerah saturasi menunjukkan kondisi seluruh domain sejajar.
- Remanensi menunjukkan kemampuan material mempertahankan magnetisasi.
- Koersivitas menunjukkan ketahanan material terhadap demagnetisasi.
- Luas loop histeresis menunjukkan besarnya energi yang hilang dalam bentuk panas selama proses magnetisasi berulang.



Gambar 5. 5 Kurva Histeresis

Material magnet lunak memiliki loop histeresis sempit dengan koersivitas kecil sehingga mudah dimagnetisasi dan didemagnetisasi. Material ini cocok digunakan pada inti transformator dan motor listrik. Sebaliknya, material magnet keras memiliki loop lebar dengan remanensi dan koersivitas tinggi sehingga sesuai untuk magnet permanen. Kurva histeresis juga memberikan informasi penting mengenai struktur mikro material. Faktor seperti ukuran butir, cacat kristal, komposisi kimia, dan perlakuan panas dapat memengaruhi bentuk loop histeresis. Oleh karena itu, analisis kurva histeresis menjadi metode utama dalam penelitian dan pengembangan material magnetik modern. Dalam aplikasi teknik, pemahaman mengenai

respons material terhadap medan magnet sangat penting untuk pengembangan perangkat elektronik, sistem penyimpanan data, transformator, sensor, motor listrik, dan material penyerap gelombang elektromagnetik. Karakterisasi melalui kurva histeresis memungkinkan penentuan material yang paling sesuai untuk aplikasi tertentu berdasarkan parameter magnetiknya.

BAB 6
MATERIAL KERAMIK

Material keramik merupakan salah satu kelompok material teknik yang memiliki peranan penting dalam perkembangan teknologi dan industri modern. Secara umum, material keramik didefinisikan sebagai material anorganik dan nonlogam yang tersusun dari senyawa logam dan nonlogam melalui ikatan ionik maupun kovalen. Material ini biasanya dibentuk melalui proses pemanasan pada temperatur tinggi sehingga menghasilkan struktur yang keras, tahan panas, dan stabil terhadap serangan kimia (Callister & Rethwisch, 2020). Dalam kehidupan sehari-hari, keramik telah digunakan sejak ribuan tahun lalu untuk peralatan rumah tangga, bahan bangunan, dan produk seni. Namun, perkembangan ilmu material telah mendorong pemanfaatan keramik menjadi lebih luas dalam bidang teknik dan teknologi maju.

Dalam dunia rekayasa material, keramik dikenal memiliki sifat unggul dibandingkan beberapa material lainnya, terutama dalam hal kekerasan, ketahanan aus, ketahanan korosi, serta kemampuan bekerja pada temperatur tinggi. Sifat-sifat tersebut menjadikan material keramik banyak digunakan pada komponen mesin, pelapis tahan panas, isolator listrik, hingga biomaterial untuk kebutuhan medis (Barsoum, 2019). Selain itu, perkembangan teknologi manufaktur modern telah menghasilkan berbagai

jenis keramik maju (*advanced ceramics*) yang memiliki karakteristik khusus sesuai kebutuhan industri.

Material keramik dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu keramik tradisional dan keramik maju. Keramik tradisional umumnya berbahan dasar tanah liat, silika, dan feldspar, serta banyak digunakan pada industri bangunan dan peralatan domestik. Sementara itu, keramik maju dibuat dari bahan baku dengan kemurnian tinggi seperti alumina (Al_2O_3), silikon karbida (SiC), dan zirkonia (ZrO_2), yang dirancang untuk aplikasi teknik dengan performa tinggi (Kingery, Bowen, & Uhlmann, 1976). Perkembangan keramik maju telah membuka peluang besar dalam bidang elektronik, aerospace, energi, dan kesehatan.

Dari sisi struktur atomik, material keramik memiliki ikatan atom yang kuat sehingga menghasilkan sifat mekanik yang tinggi. Akan tetapi, sifat tersebut juga menyebabkan keramik bersifat getas (*brittle*) dan memiliki ketangguhan retak yang relatif rendah dibandingkan logam. Oleh karena itu, penggunaan material keramik dalam aplikasi teknik memerlukan pertimbangan desain dan proses manufaktur yang tepat agar dapat meminimalkan risiko kegagalan material (Smith & Hashemi, 2018).

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan industri terhadap material berkinerja tinggi, penelitian mengenai material keramik terus berkembang. Inovasi seperti nanokeramik, biokeramik, dan keramik komposit menjadi fokus penelitian karena mampu meningkatkan sifat mekanik maupun fungsional material. Selain itu, tuntutan efisiensi energi dan teknologi ramah lingkungan juga mendorong pemanfaatan keramik dalam berbagai sistem modern, seperti sel bahan bakar (*fuel cell*), sensor, dan material isolasi termal (Rahaman, 2007).

Berdasarkan uraian tersebut, material keramik memiliki posisi strategis dalam bidang material teknik karena kombinasi sifat unik yang dimilikinya. Oleh sebab itu, pemahaman mengenai karakteristik, klasifikasi, proses pembuatan, serta aplikasi material keramik menjadi penting untuk mendukung pengembangan teknologi dan industri di masa depan.

6.1 Struktur dan Ikatan Atom Keramik

Material keramik tersusun atas kombinasi unsur logam dan nonlogam yang berikatan melalui ikatan ionik maupun kovalen. Struktur atom dan jenis ikatan yang terbentuk pada material keramik sangat memengaruhi sifat fisik, mekanik, termal, serta listrik dari material tersebut. Oleh karena itu, pemahaman mengenai struktur dan ikatan atom keramik menjadi dasar penting dalam mempelajari perilaku material keramik dalam berbagai aplikasi teknik (Callister & Rethwisch, 2020).

Tabel 6. 1 Perbandingan Ikatan Ionik dan Kovalen pada Keramik

Aspek	Ikatan Ion	Ikatan Kovalen
Mekanisme Ikatan	Transfer elektron	Pemakaian bersama elektron
Kekuatan Ikatan	Tinggi	Sangat tinggi
Sifat Listrik	Isolator	Umumnya isolator/semikonduktor
Titik Lebur	Tinggi	Sangat tinggi
Sifat Mekanik	Keras dan getas	Sangat keras

Aspek	Ikatan Ion	Ikatan Kovalen
Contoh Material	MgO, Al_2O_3	SiC, Si_3N_4

Sumber: Smith & Hashemi (2018)

6.1.1 Struktur Atom pada Material Keramik

Struktur atom material keramik umumnya tersusun secara kristalin, meskipun beberapa jenis keramik juga memiliki struktur amorf. Struktur kristalin merupakan susunan atom yang teratur dan berulang dalam tiga dimensi. Pada material keramik, susunan atom tersebut dibentuk oleh kombinasi kation dan anion yang saling berikatan untuk mencapai kondisi stabil secara energi (Barsoum, 2019).

Dalam struktur kristal keramik, ukuran ion dan muatan listrik ion sangat menentukan bentuk dan kestabilan struktur kristal. Kation biasanya memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan anion sehingga kation akan menempati ruang di antara susunan anion. Untuk menjaga netralitas muatan listrik, jumlah muatan positif dan negatif dalam struktur kristal harus seimbang (Kingery, Bowen, & Uhlmann, 1976).

Beberapa struktur kristal yang umum ditemukan pada material keramik antara lain:

1. Struktur Rock Salt (NaCl)

   Struktur ini dimiliki oleh keramik seperti magnesium oksida (MgO) dan natrium klorida (NaCl). Dalam struktur ini, setiap ion positif dikelilingi oleh enam ion negatif dan sebaliknya sehingga membentuk koordinasi oktahedral (Callister & Rethwisch, 2020).

2. Struktur Zinc Blende (ZnS)

   Struktur ini ditemukan pada seng sulfida (ZnS), di mana setiap atom memiliki koordinasi tetrahedral. Struktur ini banyak dijumpai pada material semikonduktor keramik (Van Vlack, 1989).

3. Struktur Perovskite

   Struktur perovskite banyak digunakan pada material elektronik dan ferroelektrik. Material dengan struktur ini memiliki sifat listrik dan magnetik yang unik sehingga dimanfaatkan pada kapasitor, sensor, dan superkonduktor (Smith & Hashemi, 2018).

4. Struktur Silikat

   Keramik berbasis silikat memiliki struktur dasar berupa tetrahedron SiO_4^{4-}. Struktur ini menjadi dasar pembentuk kaca, semen, dan keramik tradisional lainnya (Barsoum, 2019).

Tabel 6. 2 Jenis Struktur Kristal pada Material Keramik

Struktur Kristal	Contoh Material	Karakteristik Struktur	Aplikasi
Rock Salt (NaCl)	MgO, NaCl	Koordinasi 6:6, struktur kubik	Refraktori, isolator
Zinc Blende	ZnS	Koordinasi tetrahedral	Semi konduktor
Perovskite	$BaTiO_3$	Struktur kompleks, sifat ferroelektrik	Kapasitor, sensor

Struktur Kristal	Contoh Material	Karakteristik Struktur	Aplikasi
Silikat	SiO_2	Tetrahedron SiO_4	Kaca, semen, keramik tradisional

Sumber: Callister & Rethwisch (2020); Barsoum (2019).

Selain struktur kristalin, terdapat pula keramik amorf seperti kaca yang tidak memiliki keteraturan atom jangka panjang. Struktur amorf menyebabkan kaca memiliki sifat transparan dan isotropik (Kingery *et al*., 1976).

6.2 Ikatan Atom pada Material Keramik

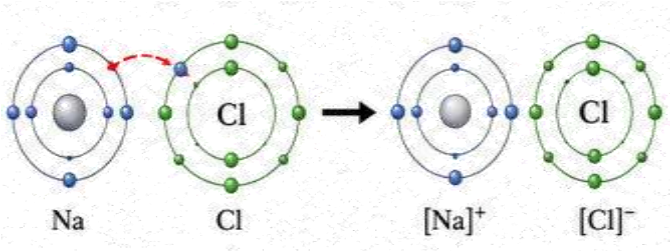
Sifat khas material keramik sangat dipengaruhi oleh jenis ikatan atom yang terbentuk. Secara umum, ikatan atom pada keramik terdiri atas ikatan ionik dan ikatan kovalen.

6.2.1 Ikatan Ionik

Ikatan ionik terjadi akibat perpindahan elektron dari atom logam ke atom nonlogam sehingga terbentuk ion positif (kation) dan ion negatif (anion). Gaya tarik elektrostatik antara ion-ion tersebut menghasilkan ikatan yang kuat (Callister & Rethwisch, 2020).

Sebagai contoh, pada magnesium oksida (MgO), atom magnesium melepaskan dua elektron kepada atom oksigen sehingga terbentuk ion Mg^{2+} dan O^{2-}. Ikatan ionik menyebabkan material keramik memiliki titik lebur tinggi, kekerasan tinggi, ketahanan kimia yang baik, serta sifat isolator listrik (Smith & Hashemi, 2018).

Namun, ikatan ionik juga menyebabkan material keramik menjadi getas karena pergeseran bidang atom dapat menghasilkan gaya tolak-menolak antar ion sejenis yang memicu retakan (Barsoum, 2019).



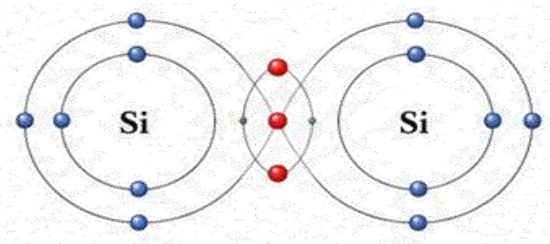
Gambar 6. 1 Mekanisme Ikatan Ionik

6.2.2 Ikatan Kovalen

Ikatan kovalen terbentuk akibat penggunaan bersama pasangan elektron antar atom nonlogam. Ikatan ini umumnya lebih terarah dibandingkan ikatan ionik sehingga menghasilkan struktur yang sangat kuat dan stabil (Van Vlack, 1989).

Contoh material keramik dengan ikatan kovalen dominan adalah silikon karbida (SiC) dan silikon nitrida (Si_3N_4). Material tersebut memiliki kekuatan mekanik tinggi, ketahanan aus yang sangat baik, dan stabil pada temperatur tinggi (Kingery *et al*., 1976).

Keramik dengan ikatan kovalen umumnya memiliki modulus elastisitas tinggi, konduktivitas listrik rendah, ketahanan panas tinggi, dan ketahanan korosi yang baik (Callister & Rethwisch, 2020).



Gambar 6. 2 Mekanisme Ikatan Kovalen

6.2.3 Kombinasi Ikatan Ionik dan Kovalen

Sebagian besar material keramik sebenarnya memiliki kombinasi ikatan ionik dan kovalen dengan proporsi yang berbeda-beda. Kombinasi ini memengaruhi sifat akhir material, termasuk kekuatan mekanik, ketahanan termal, dan sifat listriknya (Barsoum, 2019).

Sebagai contoh, alumina (Al_2O_3) memiliki karakter ionik dan kovalen sekaligus sehingga banyak digunakan sebagai isolator listrik, pelapis tahan aus, dan biomaterial (Smith & Hashemi, 2018).

6.2.4 Hubungan Struktur dan Ikatan Terhadap Sifat Keramik

Struktur kristal dan jenis ikatan atom sangat menentukan karakteristik material keramik. Ikatan atom yang kuat menyebabkan keramik memiliki kekerasan dan titik lebur yang tinggi. Akan tetapi, keterbatasan pergerakan dislokasi dalam struktur kristalnya menyebabkan keramik bersifat getas (Van Vlack, 1989).

Selain itu, struktur atom yang rapat dan stabil menjadikan keramik tahan terhadap oksidasi, korosi, dan degradasi kimia. Oleh sebab itu, material keramik banyak digunakan pada lingkungan ekstrem yang tidak

dapat ditahan oleh material logam maupun polimer (Callister & Rethwisch, 2020).

Pemahaman mengenai hubungan antara struktur, ikatan atom, dan sifat material sangat penting dalam pengembangan keramik maju (*advanced ceramics*) untuk aplikasi modern seperti komponen elektronik, biomaterial, pelapis termal, dan material aerospace (Kingery *et al*., 1976).

6.3 Sifat-Sifat Materil Keramik

Material keramik merupakan salah satu kelompok material teknik yang memiliki karakteristik unik dibandingkan logam dan polimer. Secara umum, keramik dikenal memiliki kekerasan tinggi, tahan terhadap temperatur tinggi, tahan korosi, serta memiliki sifat isolator listrik dan termal yang baik. Karakteristik tersebut dipengaruhi oleh struktur atom dan jenis ikatan ionik maupun kovalen yang kuat pada material keramik (Callister & Rethwisch, 2020).

Sifat material keramik dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok, yaitu sifat mekanik, sifat termal, sifat listrik, sifat kimia, dan sifat optik. Kombinasi sifat-sifat tersebut menyebabkan material keramik banyak digunakan dalam berbagai aplikasi teknik, mulai dari bahan bangunan hingga teknologi modern seperti biomaterial, elektronik, dan aerospace (Barsoum, 2019).

6.3.1 sifat Mekanik Keramik

1. Kekerasan Tinggi *(Hardness)*

   Keramik memiliki tingkat kekerasan yang tinggi karena adanya ikatan atom yang kuat dan stabil. Sifat ini menyebabkan keramik tahan

terhadap goresan, deformasi, dan keausan (Smith & Hashemi, 2018).

Material keramik seperti silikon karbida (SiC) dan alumina (Al_2O_3) sering digunakan sebagai:

a. Alat potong,
b. Abrasif
c. pelapis tahan aus
d. komponen mesin.

Namun, semakin tinggi kekerasan material keramik, umumnya sifat getasnya juga semakin meningkat (Van Vlack, 1989).

2. Getas *(Brittle)*

Salah satu kelemahan utama keramik adalah sifat getas, yaitu mudah patah tanpa mengalami deformasi plastis yang berarti. Keramik tidak mampu menyerap energi benturan seperti logam karena pergerakan dislokasi dalam struktur kristalnya sangat terbatas (Barsoum, 2019).

Akibatnya, keramik rentan mengalami retak ketika menerima:

a. Beban tarik
b. Benturan
c. Perubahan temperatur mendadak.

3. Kekuatan Tekan Tiggi

Keramik memiliki kekuatan tekan yang jauh lebih tinggi dibandingkan kekuatan tariknya. Oleh sebab itu, material keramik banyak digunakan pada konstruksi dan komponen yang menerima beban tekan besar (Callister & Rethwisch, 2020).

Contohnya:

a. Batu bata
b. Keramik lantai
c. Refraktori
d. Bantalan mesin

4. Ketahana Aus Tinggi

Keramik memiliki kemampuan menahan gesekan dan abrasi sehingga cocok digunakan pada lingkungan kerja ekstrem. Ketahanan aus ini dipengaruhi oleh kekerasan permukaan yang tinggi (Kingery, Bowen, & Uhlmann, 1976).

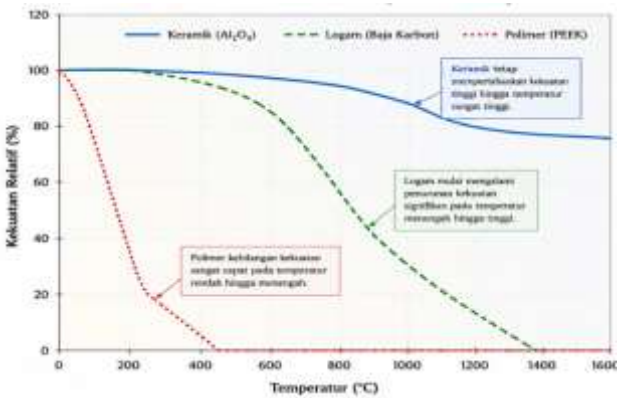
6.3.2 Sifat Termal Keramik

1. Tahan Temperatur Tinggi

Keramik memiliki titik lebur tinggi dan mampu mempertahankan kekuatannya pada temperatur ekstrem. Hal ini disebabkan oleh kuatnya ikatan atom pada struktur keramik (Rahaman, 2007).

Karena sifat tersebut, keramik digunakan sebagai:

a. Bahan refraktori
b. Pelapis tungku
c. Komponen turbin
d. Isolator panas.



Gambar 6. 3 Ketahanan Material Keramik Pada Temperature Tinggi

(Sumber: Rahaman, 2007)

2. Konduktivitas Termal Rendah

Sebagian besar keramik merupakan penghantar panas yang buruk (*thermal insulator*). Oleh karena itu, material keramik banyak digunakan sebagai bahan isolasi termal pada industri dan bangunan (Smith & Hashemi, 2018).

Namun, beberapa jenis keramik khusus seperti silikon karbida memiliki konduktivitas termal yang cukup tinggi sehingga digunakan pada aplikasi elektronik dan penukar panas.

3. Ketahanan Kejut Termal *(Thermal Shock Resistance)*

Ketahanan kejut termal merupakan kemampuan material untuk menahan perubahan temperatur secara tiba-tiba tanpa mengalami retak. Sebagian keramik memiliki ketahanan kejut termal yang rendah akibat sifat getasnya (Barsoum, 2019).

Untuk meningkatkan sifat ini, dilakukan pengendalian mikrostruktur dan penambahan material penguat.

6.3.3 Sifat Listrik Keramik

1. Isolator LIstrik

   Sebagian besar keramik bersifat isolator listrik karena tidak memiliki elektron bebas yang dapat bergerak. Oleh sebab itu, keramik banyak digunakan sebagai:

   a. Isolator tegangan tinggi
   b. Bahan substrat elektronik
   c. Komponen listrik (Callister & Rethwisch, 2020).

   Contoh keramik isolator:

   a. Porselen
   b. Alumina
   c. Silika.

2. Semikonduktor dan Superkonduktor

   Beberapa keramik maju memiliki sifat semikonduktor bahkan superkonduktor. Material ini digunakan pada teknologi elektronik modern dan sistem transmisi energi (Kingery *et al*., 1976).

   Contohnya:

   a. ZnO
   b. $BaTiO_3$
   c. YBCO (*Yttrium Barium Copper Oxide*).

6.3.4 Sifat Kimia Keramik

1. Ketahanan Korosi Tinggi

   Keramik sangat tahan terhadap serangan bahan kimia, oksidasi, dan korosi karena memiliki stabilitas kimia yang tinggi (Van Vlack, 1989).

   Sifat ini menyebabkan keramik digunakan pada:

   a. Pelapis kimia
   b. Pipa industri
   c. Tangki reaksi
   d. Biomaterial.

2. Stabilitas Kimia

   Keramik mampu mempertahankan struktur dan sifatnya pada lingkungan agresif maupun temperatur tinggi. Stabilitas ini sangat penting dalam industri kimia dan energi (Barsoum, 2019).

6.3.5 Sifat Optik Keramik

Beberapa material keramik memiliki sifat optik tertentu seperti transparansi, reflektivitas, atau kemampuan menyerap cahaya. Contohnya kaca dan keramik transparan yang digunakan pada:

1. Lensa
2. Serat optic
3. Layar elektronik
4. Pelindung optik (Callister & Rethwisch, 2020).

6.3.6 Hubungan Struktur terhadap Sifat Keramik

Sifat-sifat material keramik sangat dipengaruhi oleh:

1. Jenis ikatan atom
2. Struktur Kristal
3. Ukuran butir
4. Porositas

5. Proses manufaktur

Ikatan ionik dan kovalen yang kuat menyebabkan keramik memiliki:

1. Titik lebur tinggi
2. Kekerasan tinggi
3. Ketahanan kimia yang baik

Namun keterbatasan pergerakan atom dalam struktur kristalnya menyebabkan keramik bersifat getas (Smith & Hashemi, 2018).

Tabel 6. 3 Sifat-Sifat Utama Material Keramik

Jenis Sifat	Karakteristik	Contoh Aplikasi
Mekanik	Keras, getas, tahan aus	Abrasif, alat potong
Termal	Tahan panas, isolator termal	Refraktori, pelapis panas
Listrik	Isolator listrik	Isolator tegangan tinggi
Kimia	Tahan korosi dan oksidasi	Tangki kimia
Optik	Transparan atau reflektif	Kaca optik, serat optic

Sumber: Callister & Rethwisch (2020); Barsoum (2019).

6.4 Aplikasi Material Keramik

Material keramik merupakan salah satu kelompok material teknik yang memiliki aplikasi sangat luas dalam berbagai bidang industri. Hal ini disebabkan oleh sifat khas keramik seperti kekerasan tinggi, ketahanan terhadap temperatur tinggi, tahan korosi, stabilitas kimia yang baik,

serta kemampuan sebagai isolator listrik dan termal (Callister & Rethwisch, 2020).

Perkembangan teknologi modern telah mendorong pemanfaatan keramik tidak hanya sebagai bahan tradisional, tetapi juga sebagai material maju (*advanced ceramics*) pada bidang elektronik, energi, medis, aerospace, dan manufaktur presisi. Penggunaan material keramik terus meningkat karena mampu bekerja pada kondisi ekstrem yang sulit dipenuhi oleh logam maupun polimer (Barsoum, 2019).

6.5.1 Aplikasi Keramik pada Industri Konstruksi

Keramik telah lama digunakan dalam industri konstruksi karena memiliki kekuatan tekan tinggi, tahan cuaca, dan stabil secara kimia. Material keramik tradisional seperti batu bata, genteng, ubin, semen, dan porselen merupakan contoh penggunaan keramik pada bangunan (Van Vlack, 1989).

Selain itu, keramik juga digunakan sebagai:

1. Pelapis lantai
2. Pelapis dinding
3. Sanitasi
4. Material dekoratif

Keunggulan utama keramik pada konstruksi adalah:

1. Tahan korosi
2. Tidak mudah terbakar
3. Tahan kelembapan
4. Memiliki umur pakai panjang (Smith & Hashemi, 2018).

6.5.2 Aplikasi Keramik pada Industri Refraktori

Keramik refraktori adalah material yang mampu mempertahankan sifatnya pada temperatur sangat tinggi. Material ini digunakan sebagai pelapis tungku industri, kiln semen, peleburan logam, dan reaktor suhu tinggi (Rahaman, 2007).

Keramik refraktori umumnya berbahan:

1. Alumina (Al_2O_3)
2. Silika (SiO_2)
3. Magnesia (MgO)
4. Zirkonia (ZrO_2)

Sifat penting material refraktori meliputi:

1. Titik lebur tinggi
2. Tahan kejut termal
3. Tahan serangan kimia pada suhu tinggi (Barsoum, 2019).

6.5.3 Aplikasi Keramik pada Bidang Elektronik

Keramik memiliki sifat isolator listrik yang sangat baik sehingga banyak digunakan dalam industri elektronik. Selain sebagai isolator, beberapa keramik maju juga memiliki sifat semikonduktor, piezoelektrik, dan ferroelektrik (Callister & Rethwisch, 2020).

Aplikasi keramik dalam bidang elektronik meliputi:

1. Isolator tegangan tinggi
2. Substrat sirkuit elektronik
3. Kapasitor
4. Sensor
5. Resistor
6. Komponen mikroelektronik

Material seperti barium titanate ($BaTiO_3$) digunakan pada kapasitor keramik karena memiliki konstanta dielektrik tinggi (Kingery, Bowen, & Uhlmann, 1976).

Selain itu, aluminium oksida (Al_2O_3) banyak digunakan sebagai substrat elektronik karena:

1. Tahan panas
2. Stabil secara kimia
3. Memiliki isolasi listrik yang baik.

6.5.4 Aplikasi Keramik pada Industri Otomotif

Dalam industri otomotif, material keramik digunakan karena tahan aus, tahan temperatur tinggi, dan memiliki koefisien gesek yang baik. Keramik diaplikasikan pada:

1. Busi kendaraan
2. Cakram rem keramik
3. Catalytic converter
4. Bearing
5. Sensor mesin (Smith & Hashemi, 2018).

Keramik silikon nitrida (Si_3N_4) digunakan pada bearing mesin karena:

1. Ringan
2. Tahan panas
3. Memiliki umur pakai lebih panjang dibandingkan logam.

Selain itu, cakram rem keramik karbon banyak digunakan pada kendaraan performa tinggi karena mampu bekerja pada temperatur ekstrem tanpa mengalami deformasi (Barsoum, 2019).

6.5.5 Aplikasi Keramik pada Industri Aerospace

Industri aerospace memerlukan material yang ringan namun mampu bekerja pada temperatur dan tekanan sangat tinggi. Oleh karena itu, keramik teknik digunakan pada:

1. Pelapis termal pesawat ruang angkasa
2. Turbin mesin jet
3. Nosel roket
4. sistem proteksi panas (Callister & Rethwisch, 2020).

Keramik seperti zirkonia (*zirconia*) digunakan sebagai *thermal barrier coating* karena memiliki konduktivitas termal rendah sehingga mampu melindungi komponen logam dari panas ekstrem (Rahaman, 2007).

6.5.6 Aplikasi Keramik pada Bidang Medis

Keramik juga memiliki peranan penting dalam dunia medis karena beberapa jenis keramik bersifat biokompatibel dan tahan korosi di dalam tubuh manusia. Material keramik digunakan sebagai:

1. Implan tulang
2. Implan gigi
3. Sendi buatan
4. Alat bedah (Barsoum, 2019).

Biokeramik seperti:

1. Alumina (Al_2O_3)
2. Hidroksiapatit (HA)
3. zirkonia (ZrO_2)

Hidroksiapatit memiliki struktur yang mirip dengan mineral tulang sehingga banyak digunakan dalam rekayasa jaringan tulang (*bone tissue engineering*) (Smith & Hashemi, 2018).

6.5.7 Aplikasi Keramik pada Industri Energi

Perkembangan teknologi energi modern juga memanfaatkan material keramik dalam berbagai sistem energi karena stabil pada temperatur tinggi dan lingkungan korosif (Rahaman, 2007).

Aplikasi keramik pada bidang energi meliputi:

1. Fuel cell
2. Panel surya
3. Baterai solid-state
4. Turbin gas
5. Reaktor nuklir.

Keramik elektrolit pada *solid oxide fuel cell* (SOFC) mampu menghantarkan ion pada temperatur tinggi sehingga meningkatkan efisiensi konversi energi (Callister & Rethwisch, 2020).

Tabel 6. 4 Aplikasi Material Keramik dalam Berbagai Bidang

Bidang	Contoh Aplikasi	Jenis Keramik
Konstruksi	Bata, ubin, semen	Silikat
Elektronik	Isolator, kapasitor	Alumina, $BaTiO_3$
Otomotif	Rem keramik, bearing	Si_3N_4
Aerospace	Pelapis termal	ZrO_2
Medis	Implan tulang dan gigi	Alumina, HA
Energi	Fuel cell	Zirkonia
Manufaktur	Abrasif dan alat potong	SiC

Sumber: Callister & Rethwisch (2020); Barsoum (2019)

BAB 7
MATERIAL POLIMER

7.1 Pengertian Material Polimer

Material polimer merupakan material yang tersusun dari rantai panjang molekul hasil penggabungan monomer melalui proses polimerisasi. Karakteristiknya ringan, mudah dibentuk, tahan korosi, (Callister, 2020).

Polimer dibedakan atas polimer alami seperti selulosa dan kar*et al*am dan polimer sintetis meliputi polyethylene (PE), polypropylene (PP), dan polyvinyl chloride (PVC) (Fried, 2014).

7.2 Sejarah Perkembangan Polimer

Polimer alami telah dimanfaatkan sejak zaman kuno karena sifatnya yang fleksibel, ringan, dan mudah diperoleh. (Callister, 2020).

Perkembangan penting pada polimer alami terjadi ketika Charles Goodyear menemukan proses vulkanisasi pada tahun 1839. Dengan menambahkan sulfur ke dalam kar*et al*am dapat meningkatkan kekuatan, elastisitas, dan ketahanan panas karet. Penemuan tersebut menjadi tonggak penting dalam perkembangan industri polimer modern (Fried, 2014).



Gambar 7. 1 Kebun Karet

(Sumber :puslitkater, 2021)



Gambar 7. 2 Produk Polymer Alami

(Sumber: Harapanrakyat, 2021)

7.3 Revolusi Plastik Sintetis

Perkembangan besar material polimer dimulai pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20 melalui penemuan plastik sintetis. Revolusi ini muncul akibat kebutuhan industri terhadap material yang lebih murah, ringan, tahan korosi, dan mudah diproduksi dibanding logam maupun bahan alami.

Pada tahun 1907, Leo Baekeland berhasil menciptakan Bakelite, yaitu plastik sintetis pertama yang dibuat dari reaksi fenol dan formaldehida. Bakelite memiliki sifat keras, tahan

panas, dan isolator listrik yang baik. Penemuan ini menandai dimulainya era plastik sintetis modern (Crawford, 1998).

Selanjutnya, perkembangan industri petrokimia menghasilkan berbagai jenis polimer sintetis seperti: Polyethylene (PE); Polypropylene (PP); Polyvinyl Chloride (PVC); Polystyrene (PS) ; Nylon .



Gambar 7. 3Transformasi Plastik

(Sumber www.wastetrade.com)

7.4 Perkembangan Polimer Modern

Sejak akhir abad ke-20 hingga saat ini, Polimer modern seperti Engineering polymers, High-performance polymers, Smart polymers, Biopolymers, Nanocomposites dikembangkan untuk aplikasi teknik yang lebih kompleks seperti industri dirgantara, otomotif, medis, dan elektronika, sehingga perkembangan polimer berfokus pada produksi massal plastik serta peningkatan sifat mekanik, termal, kimia, dan fungsional material.

Engineering polymer seperti PEEK (*Polyether Ether Ketone*) dan polycarbonate memiliki kekuatan tinggi serta tahan temperatur sehingga digunakan pada komponen mesin dan pesawat terbang (Young & Lovell, 2011). Selain itu, berkembang pula konsep smart polymer, yaitu polimer yang mampu merespons perubahan lingkungan seperti

temperatur, cahaya, atau medan listrik. Contohnya digunakan pada sensor, aktuator, dan biomaterial medis.

Saat ini penelitian polimer juga diarahkan pada pengembangan material ramah lingkungan seperti: Bioplastik , Polimer biodegradable dan Polimer daur ulang. Pengembangan tersebut bertujuan mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah plastik sintetis yang sulit terurai (Fried, 2014).



Gambar 7. 4 Perkembangan Polymer Modern

(sumber: pmc.ncbi.nlm.nih.gov, 2021)

7.5 Klasifikasi Material Polimer

Material polimer dapat diklasifikasikan berdasarkan:

a. Perilaku terhadap panas
b. Struktur molekul
c. Sumber bahan baku
d. Mekanisme pembentukan
e. Sifat mekanik dan elastisitas

Klasifikasi ini penting dalam teknik material karena menentukan:

a) Proses manufaktur

b) Sifat mekanik

c) Ketahanan temperatur

d) Aplikasi industri

(Callister, 2020).

Klasifikasi Berdasarkan Perilaku terhadap Panas

Berdasarkan respons terhadap pemanasan, polimer dibagi menjadi: a) Termoplastik; b) Termoset ; c) Elastomer

A. Termoplastik

Termoplastik adalah polimer yang dapat melunak ketika dipanaskan dan mengeras kembali saat didinginkan tanpa mengalami perubahan struktur kimia utama (Fried, 2014). Proses ini dapat dilakukan berulang kali sehingga termoplastik mudah didaur ulang.

Struktur Molekul Thermoplastis Umumnya Linear, Sedikit bercabang. Ikatan antar rantai relatif lemah sehingga rantai dapat bergerak saat dipanaskan.

Karakteristik Thermoplastis

a. Mudah dibentuk

b. Dapat didaur ulang

c. Fleksibel

d. Tahan korosi

e. Temperatur kerja relatif rendah

Tabel 7. 1 Contoh Material Thermoplastis dan Aplikasinya

Material Thermoplastis	Aplikasi
Polyethylene (PE)	Pipa, kantong plastik
Polypropylene (PP)	Komponen otomotif
Polyvinyl Chloride (PVC)	Pipa dan kabel
Polystyrene (PS)	Kemasan
Nylon	*Gear dan Bearing*

Sumber: Fried (2014)

B. Termoset

Termoset merupakan polimer yang mengalami pengerasan permanen setelah proses pemanasan dan pembentukan sehingga material tidak dapat dilelehkan kembali (Smith, 2016). Hal ini terjadi karena terbentuknya ikatan silang (*cross-linking*) yang kuat antar rantai polimer.

Adapun Karakteristik Thermoset meliputi:

a. Keras dan kaku
b. Tahan panas tinggi
c. Stabil secara dimensional
d. Tidak dapat didaur ulang melalui peleburan

Tabel 7. 2 Contoh Material Thermoset dan Aplikasinya

Material Thermoset	Aplikasi
Epoxy	Perekat dan komposit
Bakelite	Isolator listrik
Polyester resin	Fiberglass

Melamine	Peralatan rumah tangga

Sumber: Fried (2014)

C. Elastomer

Elastomer memiliki sedikit ikatan silang sehingga rantai tetap fleksibel namun tidak mudah terpisah hal tersebut menyebabkan Elastomer memiliki sifat elastis tinggi sehingga dapat mengalami deformasi besar dan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepas (Young & Lovell, 2011).

Beberapa Karakteristik yang dimiliki Elastomer seperti Elastis, Fleksibel, Tahan getaran dan Peredam kejut baik

Tabel 7. 3 Contoh Material Thermoset dan Aplikasinya

Material Elastomer	Aplikasi
Kar*et al*am	Ban kendaraan
Neoprene	Seal dan gasket
Silicone rubber	Peralatan medis
Nitrile rubber	Seal oli

Sumber: Fried (2014)

Klasifikasi Berdasarkan Struktur Molekul

Berdasarkan struktur molekul Polimer diklasifikasikan sebagai berikut:

a. Polimer Linear

b. Polimer Bercabang (Branched)

c. Polimer Cross-Linked

d. Network Polymer

Tabel 7. 4 Perbandingan Jenis Polimer

Jenis	Struktur	Sifat Utama	Dapat Dilelehkan
Termoplastik	Linear	Fleksibel	Ya
Termoset	Cross-linked	Keras	Tidak
Elastomer	Sedikit cross-link	Elastis	Terbatas

Sumber: Callister (2020)

Klasifikasi Berdasarkan Sumber

Berdasarkan sumbernya diklasifikasikan sebagai polimer alami dan Syntetis.

Tabel 7. 5 Klasifikasi Polymer Berdasarkan Sumber

Jenis	Contoh	Sumber
Polimer alami	Selulosa	Tumbuhan
Polimer alami	Protein	Hewan
Polimer sintetis	PE	Petrokimia
Polimer sintetis	Nylon	Industri kimia

Sumber: Fried (2014)

Berdasarkan Mekanisme Polimerisasi diklasifikasikan sebagai:

a. Polimer Adisi (terbentuk tanpa menghasilkan produk samping). Contoh material: PE, PP, PVC

b. Polimer Kondensasi(terbentuk disertai pelepasan molekul kecil seperti air). Contoh: Nylon, Polyester

7.6 Struktur Atom Penyusun Polimer

7.6.1 Struktur Dasar dan Ikatan Polimer

Struktur rantai polimer adalah susunan geometris rantai molekul polimer yang terbentuk dari monomer-monomer. Struktur rantai sangat mempengaruhi sifat material seperti kekuatan, fleksibilitas, densitas, dan ketahanan panas (Young & Lovell, 2011).

Struktur atom dan struktur rantai polimer menentukan sifat material polimer. Atom karbon sebagai unsur utama memungkinkan pembentukan rantai panjang melalui ikatan kovalen. Variasi struktur rantai seperti linear, branched, cross-linked, dan network menyebabkan perbedaan sifat mekanik, termal, dan kimia pada material polimer.

Jenis Struktur Rantai Polimer

a. Polimer Linear, memiliki rantai lurus dan panjang tanpa percabangan. Contoh: HDPE; Nylon; PVC. Bentuk Struktur Rantai sederhana: −C−C−C−C−C−
b. Polimer Branched (Bercabang), memiliki cabang pada rantai utama.
c. Polimer *Cross-Linked, r*antai polimer saling terhubung melalui ikatan silang.
d. *Network Polymer,* Memiliki struktur jaringan tiga dimensi yang kompleks.

7.6.2 Derajat Polimerisasi (*Degree of Polymerization*)

1. Pengertian Derajat Polimerisasi

   Derajat polimerisasi (*Degree of Polymerization/DP*) adalah jumlah unit monomer yang bergabung membentuk satu molekul rantai polimer. Semakin besar jumlah monomer yang tersusun maka semakin panjang ranta dan semakin tinggi derajat polimerisasinya. Semakin sedikit jumlah monomer maka rantai semakin pendek dan derajat polimerisasinya semakin rendah (Fried, 2014). Panjang rantai polimer berpengaruh terhadap sifat mekanik, kekuatan, viskositas, dan temperatur leleh material.

2. Konsep Dasar Derajat Polimerisasi

   Misal diketahui Etilena sebagai monomer dan Polyethylene merupakan polimer. Pada reaksi sederhana polimer dinyatakan sebagai $n(CH_2{=}CH_2) \rightarrow [-CH_2-CH_2-]_n$. Nilai n menunjukkan jumlah monomer yang bergabung dan disebut derajat polimerisasi. Pada n berjumlah 100 rantai relatif pendek, untuk n sejumlah 10.000, rantai sangat panjang (Callister, 2020).

3. Rumus Derajat Polimerisasi

   Derajat polimerisasi merupakan perbandingan berat molekul polimer terhadap berat molekul monomer.

   Persamaan umum: $\text{Dp} = \frac{\text{Mp}}{\text{Mo}}$

   Keterangan:

   - DP = derajat polimerisasi
   - Mp = berat molekul polimer

- M0 = berat molekul monomer

Contoh, bila Berat molekul polyethylene = 280.000 g/mol serta Berat molekul etilena = 28 g/mol,

Maka Dp, $= \frac{\text{Mpolyethelen}}{\text{Metilena}} = \frac{280.000}{28} = 10.000$

Artinya: Satu rantai polyethylene tersusun dari sekitar 10.000 unit monomer etilena.

4. Jenis Derajat Polimerisasi

Derajat Polimerisasai diklasifikasikan atas:

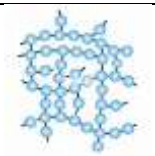
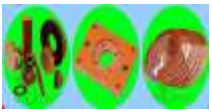
a. *Number Average Degree of Polymerization*: Berdasarkan rata-rata jumlah molekul.

b. *Weight Average Degree of Polymerization*: Dipengaruhi distribusi berat molekul.

Karena ukuran rantai polimer tidak selalu sama, konsep rata-rata berat molekul lebih sering digunakan (Fried, 2014).

Tabel 7. 6 Struktur Rantai Polimer

Struktur Rantai Polymer	Ilustrasi Rantai	Karakteristik	Contoh Material	Contoh Produk
Linear		Kuat dan rapat	HDPE	 (sumber: kibrispdr.org)
Branched		Fleksibel	LDPE	 (sumber: siu-bijiplastik.com)

Cross-linked		Keras dan tahan panas	Epoxy	 (sumber:
Network		Sangat kaku	Bakelite	 (sumber:

Sumber: Young & Lovell (2011)

5. Pengaruh Derajat Polimerisasi terhadap Sifat Polimer

Semakin tinggi derajat polimerisasi berpengaruh terhadap sifat polimer seperti diuraikan pada tabel 7.7.

Tabel 7. 7 Sifat Polimer terhadap Peningkatan Derajat Polimer

Sifat Polimer	Pengaruh yang terjadi
Kekuatan tarik	Meningkat
Kekerasan	Meningkat
Titik leleh	Meningkat
Viskositas	Meningkat
Fleksibilitas proses	Menurun

Rantai polimer yang makin panjang menyebabkan ikatan antar rantai menjai lebih kuat, gerakan molekul lebih sulit serta material menjadi

lebih kuat dan stabil. Namun material menjadi lebih sulit diproses serta temperatur pencairan meningkat. (Smith, 2016).

6. Faktor yang Mempengaruhi Derajat Polimerisasi

   Derajat polimerisasi dipengaruhi oleh:

   a. Temperatur: Temperatur terlalu tinggi dapat memutus rantai polimer.

   b. Konsentrasi Monomer: Semakin banyak monomer, meningkatkan peluang pembentukan rantai panjang.

   c. Katalis: Katalis dapat membantu mempercepat pembentukan rantai polimer.

   d. Waktu Reaksi: Semakin lama reaksi, menyebabkan rantai polimer cenderung semakin panjang.

Tabel 7. 8 Contoh Hubungan DP dan Sifat Material

DP	Panjang Rantai	Sifat Material
Rendah	Pendek	Lunak
Sedang	Menengah	Fleksibel
Tinggi	Panjang	Kuat dan keras

Sumber: Callister (2020)

7. Kristalinitas pada Polimer

   A. Konsep Dasar

      Kristalinitas polimer merupakan tingkat keteraturan susunan rantai molekul polimer dalam material. Pada daerah kristalin, rantai-rantai polimer tersusun lebih teratur dan rapat,

sedang pada daerah amorf rantai tersusun acak dan tidak beraturan (Callister, 2020). Polimer umumnya tidak sepenuhnya kristalin maupun sepenuhnya amorf, tetapi merupakan kombinasi keduanya sehingga disebut semi-kristalin.

B. Konsep Struktur Kristalin dan Amorf

1) Struktur Kristalin

Pada struktur kristalin, rantai polimer tersusun sejajar dan rapat sehingga menghasilkan:

- Kekuatan lebih tinggi
- Kekakuan meningkat
- Ketahanan panas lebih baik
- Densitas lebih tinggi

2) Struktur Amorf

Pada struktur amorf, rantai polimer tersusun acak sehingga:

- Lebih fleksibel
- Transparan
- Lebih mudah dibentuk
- Ketahanan panas lebih rendah

(Fried, 2014)



Gambar 7. 5 Struktur Kristalin

(sumber: istockphoto.com)

Tabel 7. 9 Karakteristik Kristalin

Susunan Molekul	Karakteristik	Contoh
Polimer Kristalin	Kuat, Kaku, Tahan panas	HDPE , Nylon, Polypropylene
Polimer Amorf	Transparan, Fleksibel, Mudah dibentuk	Polystyrene, PMMA , Polycarbonate
Polimer Semi-Kristalin	Gabungan Kristalin dan Amorf	PET, Nylon, PE

3) Derajat Kristalinitas

Kristalinitas dinyatakan dalam persentase bagian kristalin dalam material polimer.

Persamaan umum Derajat Kristalin, Xc:

$$Xc = \frac{W_c}{W} * 100\%$$

Keterangan:

Xc = derajat kristalinitas

Wc = berat bagian kristalin

W = berat total material

Tabel 7. 10 Interpretasi Nilai Derajat Kristalinitas

Derajat Kristalinitas	Karakteristik
Rendah	Fleksibel dan lunak
Sedang	Semi-kristalin
Tinggi	Kuat dan kaku

4) Faktor yang Mempengaruhi Kristalinitas

a. Struktur Rantai Polimer

Rantai linear lebih mudah membentuk kristal dibanding rantai bercabang.

b. Pendinginan

Pendinginan lambat memberi waktu rantai polimer tersusun teratur sehingga kristalinitas meningkat. Pendinginan cepat menghasilkan struktur amorf.

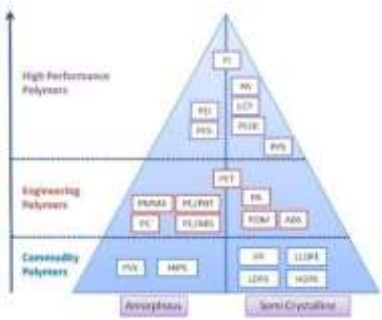
c. Berat Molekul

Berat molekul terlalu tinggi menyebabkan rantai sulit tersusun rapi.

d. Adanya Cabang atau Gugus Samping

Cabang pada rantai menghambat keteraturan susunan molekul.

(Smith, 2016).



Gambar 7. 6 Contoh Jenis Kristalin

(sumber: www.honymaterials.com)

7.7 Proses Pembentukan Polimer

7.7.1 Polimerisasi

Polimerisasi merupakan reaksi pembentukan polimer dari monomer. Proses pembentukan polimer adalah proses kimia yang mengubah molekul kecil (*monomer*) menjadi molekul rantai panjang (*polimer*) melalui reaksi polimerisasi. Dalam proses ini, ribuan hingga jutaan monomer dapat bergabung membentuk rantai molekul besar dengan sifat mekanik dan kimia tertentu (Callister, 2020).

Proses pembentukan polimer sangat penting karena menentukan: Struktur rantai polimer , Berat molekul, Derajat polimerisasi, Kristalinitas dan Sifat mekanik material

Secara umum proses pembentukan polimer dibagi menjadi:

1. Polimerisasi adisi
2. Polimerisasi kondensasi

1. Polimerisasi Adisi

Polimerisasi adisi merupakam pembentukan polimer tanpa menghasilkan produk samping. Monomer yang digunakan memiliki ikatan rangkap karbon (*C=C*) (Smith, 2016). Mekanisme Dasar Ikatan rangkap karbon terbuka kemudian monomer saling bergabung membentuk rantai panjang.

Tahapan Polimerisasi Adisi meliputi:

a. Inisiasi (*Initiation*): Radikal bebas atau katalis membuka ikatan rangkap monomer. $R^{*}+CH_2$ = CH2 terbuka menjadi $R–CH_2–CH_2^{*}$

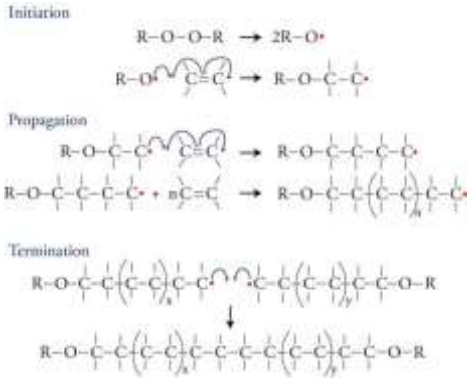
b. Propagasi (*Propagation*): tahap ini rantai polimer tumbuh karena monomer terus bergabung menjadi :

$$R-(CH_2-CH_2)_n^{*}+CH_2=CH_2$$

c. Terminasi (*Termination*): Pertumbuhan rantai berhenti akibat beberapa hal yaitu: Penggabungan radikal, transfer atom, Penghambatan reaksi.

(Fried, 2014).

Contoh tahapan Polimerisasi Adisi



Gambar 7. 7 Tahapan Polimerisasai Adisi

(sumber: preparatorychemistry.com)

2. Polimerisasi Kondensasi

Polimerisasi kondensasi adalah pembentukan polimer yang disertai pelepasan molekul kecil seperti: Air (H_2O), Metanol , HCl. (Callister, 2020). Proses ini memiliki karakteristik Reaksi lebih lambat, dihasilkan produk samping dan banyak digunakan pada *engineering* polymer.

7.1.2 Teknik Industri Pembentukan Polimer

Dalam industri, pembentukan polimer dilakukan dengan beberapa metode proses. Metoda pembentukannya ditampilkan pada tabel 7.11 berikut.

Tabel 7. 11 Perbandingan Metoda Pembentukan Polimer

Metoda	Uraian	Keunggulan	Kelemahan
Bulk Polymerization	Polimerisasi dilakukan	• Produk murni	• Sulit mengontrol panas

	hanya menggunakan monomer dan inisiator tanpa pelarut.	• Proses sederhana	
Solution Polymerization	Monomer dilarutkan dalam pelarut.	• Kontrol temperatur lebih baik	• Perlu pemisahan pelarut
Suspension Polymerization	Monomer didispersikan dalam air membentuk butiran kecil.	• Mudah mengontrol panas	• **Suspension Polymerization**
Emulsion Polymerization	Menggunakan emulgator sehingga monomer membentuk emulsi dalam air.	• Reaksi cepat • Berat molekul tinggi	

Sumber: Callister (2020)

7.1.3 Faktor Yang Mempengaruhi Pembentukan Polimer

Beberapa Faktor yang harus diperhatikan dalam pembentukan polimer seperti:

a. Temperatur,

Temperatur berpengaruh terhadap Kecepatan reaksi, Berat molekul, Struktur polimer Temperatur terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi pada rantai.

b. Tekanan

Tekanan tinggi membantu dalam pembentukan polimer tertentu seperti polyethylene.

c. Katalis

Katalis mempercepat reaksi dan mengontrol struktur polimer.

d. Waktu Reaksi

Semakin lama waktu reaksi menyebabkan rantai semakin panjang serta peningkatan pada Berat molekul.

7.1.4 Pengaruh Proses Pembentukan terhadap Sifat Material

Beberapa Proses dalam pembentukan dapat mempengaruhi sifat material, antara lainnya ditunjukkan pada tabel berikut

Faktor Proses	Sifat yang dipengaruhi
Berat molekul tinggi	Peningkatan pada Kekuatan
Pendinginan cepat	Terbentuk Struktur amorf
Pendinginan lambat	Peningkatan Kristalinitas

Cross-linking tinggi	Kekakuan meningkat

Sumber: Smith (2016)

7.8 Sifat Material Polimer

Sifat material polimer merupakan karakteristik yang dimiliki material polimer akibat struktur molekul, jenis ikatan, berat molekul, serta susunan rantai polimernya. Sifat-sifat tersebut menentukan kemampuan polimer dalam menerima beban, temperatur, lingkungan kimia, maupun aplikasi teknik tertentu (Callister, 2020).

Secara umum sifat material polimer dibagi atas:

1. Sifat mekanik
2. Sifat termal
3. Sifat listrik
4. Sifat kimia
5. Sifat optik dan fisik

1. Sifat Mekanik Polimer

Sifat mekanik adalah kemampuan material menerima gaya atau beban tanpa mengalami kerusakan. Sifat mekanik meliputi:

A. Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*)

Kekuatan tarik adalah kemampuan polimer menahan beban tarik maksimum sebelum mengalami patah. Kekuatan ini diformulasikan sebagai: $\sigma=F/A$

Keterangan:

- σ = tegangan
- F = gaya
- A = luas penampang

(Callister, 2020).

Karakteristik kekuatan tarik dipengaruhi oleh: Berat molekul, kristalinitas dan Struktur rantai.

B. Elastisitas

Elastisitas adalah kemampuan material kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan. Nilainya dinyatakan sebagai modulus elastisitas, yang diformulasikan dalam $E=\sigma/\varepsilon$.

Keterangan:

- E = modulus elastisitas (satuan: Pascal, Pa)
- σ = tegangan
- ε = regangan (strain), yaitu perubahan panjang relatif terhadap panjang awal, dirumuskan sebagai $\varepsilon=\Delta L/L0$.

(Fried, 2014).

C. Kekerasan (*Hardness*)

Kekerasan merupakan kemampuan polimer menahan deformasi permanen akibat penetrasi atau goresan. Dipengaruhi oleh struktuk Cross-linking, Kristalinitas dan Struktur rantai

D. Ketangguhan (*Toughness*)

Ketangguhan adalah kemampuan material menyerap energi sebelum patah. Polimer yang tangguh menunjukkan tidak mudah retak serta mampu menerima benturan.

E. Creep

Creep adalah terjadinya deformasi perlahan akibat pembebanan terus menerus dalam waktu lama. Polimer sangat sensitif terhadap creep terutama pada temperatur tinggi (Smith, 2016).

Tabel 7. 12 Perbandingan Sifat Mekanik Beberapa Polymer

Material	Kekuatan Tarik	Elastisitas	Ketangguhan
PE	Rendah	Tinggi	Sedang
Nylon	Tinggi	Sedang	Tinggi
Epoxy	Sangat tinggi	Rendah	Rendah

Sumber: Callister (2020)

2. Sifat Termal Polimer

Sifat termal Polimer berkaitan dengan perilaku polimer terhadap temperatur. Sifat Termal meliputi:

A. Temperatur Transisi Gelas (*Glass Transition Temperature, Tg*)

Tg adalah temperatur ketika polimer berubah dari keadaan keras dan getas menjadi lunak dan elastis. Saat Di bawah Tg maka polimer dalam keadaan keras dan bila di atas Tg material menjadi fleksibel. (Fried, 2014).

B. Temperatur Leleh (*Melting Temperature, Tm)*

Tm adalah temperatur ketika daerah kristalin polimer mulai meleleh. Polimer kristalin memiliki nilai Tm yang pasti sementara polimer Amorf tidak memiliki Tm yang pasti.

C. Konduktivitas Panas(*thermal conductivity*)

Konduktivitas panas adalah kemampuan material menghantarkan panas. Semakin kecil nilai konduktivitas panas material semakin baik sebagai isolator.

Tabel 7. 13 Beberapa Sifat Termal Polymer

Material	Tg (°C)	Tm (°C)	Konduktivitas Panas (W/m·K)
PE	-125	130	0,30 - 0,52
Nylon	50	265	0,23 - 0,32
PVC	80	212	0,14 - 0.19

Sumber: Fried (2014)

3. Sifat Listrik Polimer

Sebagian besar polimer bersifat isolator listrik karena tidak memiliki elektron bebas dan memiliki karakteristik Resistivitas tinggi , Konduktivitas rendah serta Tahan arus bocor. Beberapa polimer tertentu dapat menghantarkan listrik setelah dimodifikasi. Dikenal sebagai Polimer Konduktif seperti Polyaniline dan Polypyrrole.

4. Sifat Kimia Polimer

Sifat kimia menunjukkan kemampuan polimer bertahan terhadap lingkungan kimia. Sifat kimia meliputi:

A. Ketahanan Korosi

Polimer umumnya tahan terhadap air, asam tertentu, dan garam, sehingga polimer banyak

digunakan pada tangki kimia, pipa ataupun Pelapis anti korosi. (Callister, 2020).

B. Ketahanan terhadap Pelarut

Beberapa polimer dapat larut atau mengembang dalam pelarut tertentu.Contoh PVC tahan air, PS mudah larut pelarut organik

C. Degradasi Kimia

Polimer dapat mengalami Oksidasi, Degradasi UV, Hidrolisis

5. Sifat Optik dan Fisik

Sifat optik adalah kemampuan polimer untuk berinteraksi terhadap cahaya. Sifat fisik merupakan karakteristik dasar material yang dapat diamati atau diukur tanpa mengubah komposisi kimia material.

7.9 Proses Manufaktur Material Polimer

Proses manufaktur material polimer adalah proses pembentukan material polimer menjadi produk tertentu melalui perlakuan panas, tekanan, dan pencetakan. Proses ini bertujuan menghasilkan produk dengan bentuk, ukuran, dan sifat mekanik sesuai kebutuhan aplikasi teknik (Callister, 2020). Berbagai proses manufaktur seperti *Injection Molding, Extrusion, Blow Molding, Compression Molding, Thermoforming, Rotational Molding*, Dan *3D Printing* dipilih berdasarkan jenis material, bentuk produk, serta kebutuhan produksi.

1. Tahapan Umum Manufaktur Polimer

   Secara umum proses manufaktur polimer dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

   a. Persiapan bahan baku
   b. Pelelehan material
   c. Pembentukan produk
   d. Pendinginan
   e. Finishing

2. Proses Manufaktur Material Polimer

   Beberapa proses manufaktur yang digunakan untuk polimer seperti

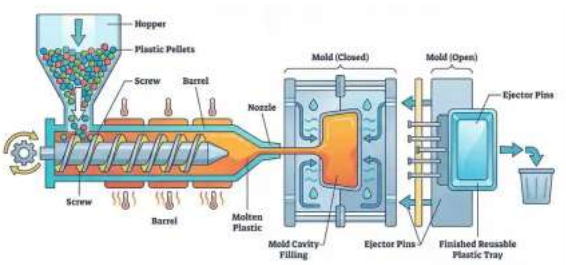
   - *Injection Molding*
   - *Extrusion*
   - *Blow Molding*
   - *Compression Molding*
   - *Thermoforming*
   - *3D Printing Polimer*

   1. Injection Molding

   Injection molding adalah proses pembentukan polimer dengan cara melelehkan material kemudian meng-injeksikannya ke dalam cetakan (*mold*) dengan tinggi (Crawford, 1998).

Prinsip Kerja *Injection Moulding* meliputi tahapan berikut :

1. Pellet polimer dimasukkan ke hopper
2. Material dipanaskan dalam barrel
3. Screw mendorong material cair
4. Material diinjeksi ke mold
5. Pendinginan
6. Produk dikeluarkan



Gambar 7. 8 Skema Proses Injeksi Molding

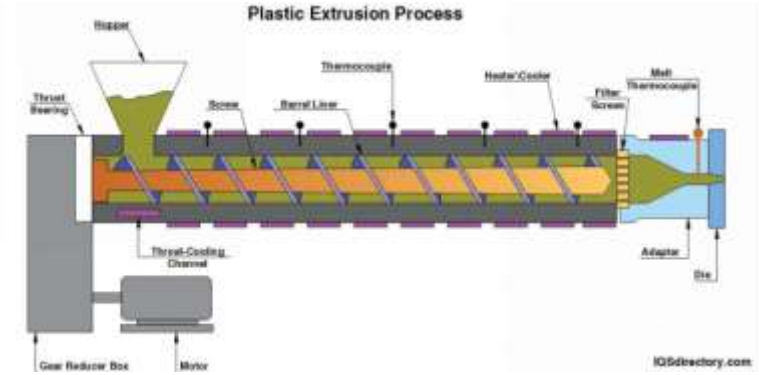
(sumber: vantageplastics.com)

2. *Extrusion*

Extrusion adalah proses pembentukan polimer kontinu dengan cara mendorong material cair melalui cetakan (*die*) tertentu (Callister, 2020).

Tahapan proses extrusi meliputi:

1. Material masuk hopper
2. Screw memutar dan mendorong material
3. Material dipanaskan
4. Material keluar melalui die
5. Pendinginan produk



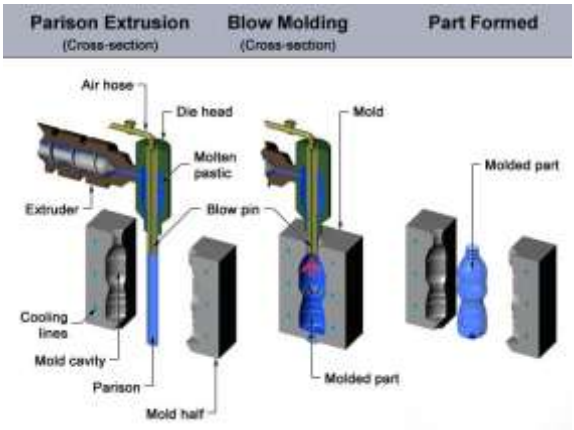
Gambar 7. 9 Skema Proses Ekstrusi

(sumber: IQS Directory Editorial Team)

3. *Blow Molding*

Blow molding digunakan untuk membuat produk berongga dengan cara meniup material polimer panas di dalam cetakan. Tahap proses Blow Moulding meliputi:

1. Membentuk parison
2. Parison dimasukkan ke mold
3. Udara ditiup
4. Material mengikuti bentuk mold
5. Pendinginan



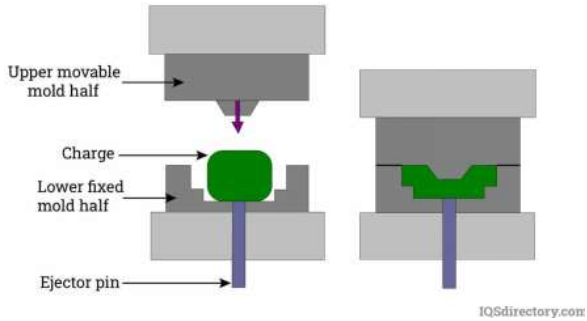
Gambar 7. 10 Skema Proses Blow Moulding

(sumber: www.globalspec.com)

4. *Compression Molding*

Compression molding adalah proses pembentukan termoset atau elastomer dengan cara menekan material di dalam cetakan panas. Tahapan proses sebagai berikut:

1. Material ditempatkan pada mold
2. Mold ditutup
3. Tekanan dan panas diberikan
4. Material mengeras

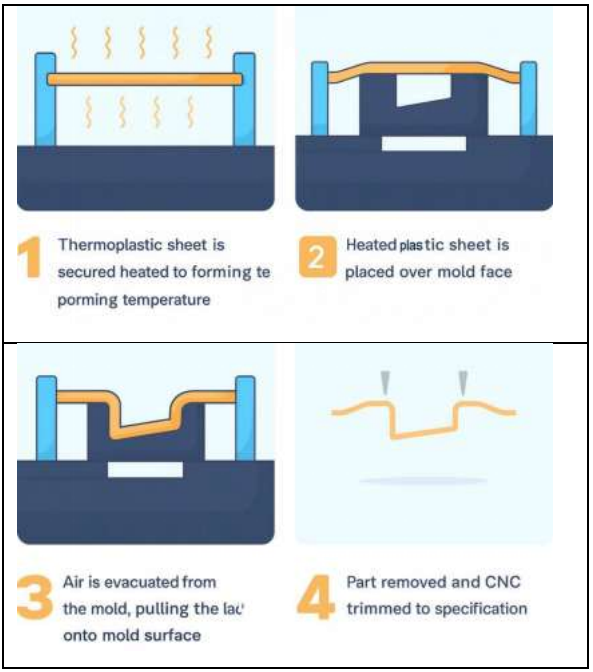


Gambar 7. 11 Skema Proses Ekstrusi

(sumber: IQS Directory Editorial Team)

5. Thermoforming

   Thermoforming dilakukan dengan meemanakan lembaran termoplastik hingga lunak kemudian dibentuk menggunakan cetakan.

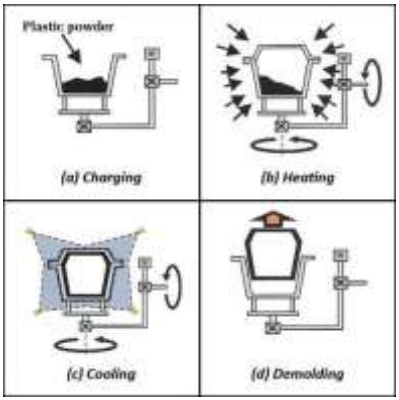


Gambar 7. 12 Skema Proses Thermoforming

(sumber: advancedplastiform.com)

6. *Rotational Molding*

Proses Rotational molding dilakukan dengan memutar mold saat dipanaskan sehingga material melapisi dinding mold secara merata.



Gambar 7. 13 Skema Proses *Thermoforming*

(sumber: www.bpf.co.uk)

7. 3D Printing Polimer

3D printing merupakan proses manufaktur aditif yang membentuk produk lapis demi lapis berdasarkan model digital. Pada FDM (*Fused Deposition Modeling*) Filamen polimer dilelehkan dan disusun lapis demi lapis.

Agar Produk Polimer yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi, terdapat beberapa faktor penting, yang dikenal sebagai parameter dalam proses manufaktur polimer meliputi

1. Temperatur : Temperatur terlalu tinggi menyebabkan degradasi polimer.
2. Tekanan: Mempengaruhi pengisian mold dan kualitas produk.
3. Laju Pendinginan: Proses Pendinginan sangat berpengaruh terhadap: kristalinitas, shrinkage (penyusutan) dan Tegangan sisa yang terjadi.

4. Viskositas Material: Semakin tinggi viskositas Aliran semakin sulit (Smith, 2016).

3. Cacat Produk pada Manufaktur Polimer

Cacat produk manufaktur adalah ketidaksesuaian bentuk, dimensi, struktur, atau kualitas permukaan produk hasil suatu proses manufaktur sehingga tidak memenuhi spesifikasi *desain* maupun fungsi produk. Cacat pada proses manufaktur polimer dapat terjadi akibat kombinasi faktor material, parameter proses, dan desain cetakan. Jenis cacat yang terjadi seperti void, sink mark, warpage, flash, short shot, weld line, burn mark, bubble, delamination, dan jetting. Karena cacat produk sangat mempengaruhi kualitas produk maka sangat penting dilakukan pengendalian dalam proses manufaktur. (Crawford, 1998). Uraian mengenai cacat produk disarikan pada tabel 7.14.

Gambar 7. 14 Jenis Cacat Produk Polymer

Jenis Cacat	Penyebab	Dampak	Pencegahan
Void :Void adalah rongga kosong atau gelembung udara di dalam produk pendinginan.	Pendinginan terlalu cepat Tekanan injeksi rendah Udara terjebak Ketebalan produk tidak merata	Kekuatan menurun Produk mudah retak Penurunan kualitas visual	Ventilasi mold lebih baik Pendinginan merata
Sink mark adalah cekungan kecil pada permukaan produk akibat penyusutan material selama pendinginan	Pendinginan tidak merata Ketebalan produk terlalu besar Holding pressure kurang	Penampilan buruk Dimensi tidak akurat	Mengurangi ketebalan produk Meningkatkan holding pressure Pendinginan lebih baik
Warpage adalah perubahan bentuk atau melengkungnya produk akibat penyusutan tidak seragam selama pendinginan	Pendinginan tidak merata Perbedaan ketebalan Tegangan sisa tinggi	Produk melengkung Kesulitan perakitan	Desain ketebalan seragam Pendinginan merata Kontrol temperatur mold
Flash adalah material berlebih yang keluar dari celah mold sehingga membentuk	Tekanan terlalu tinggi Mold tidak rapat Keausan mold	Produk harus difinishing Dimensi tidak presisi	Mengurangi tekanan injeksi Memperbaiki mold

Jenis Cacat	Penyebab	Dampak	Pencegahan
lapisan tipis di tepi produk.			Menjaga presisi penutupan mold
Short shot adalah kondisi ketika material tidak mampu mengisi seluruh rongga mold.	Temperatur rendah Tekanan injeksi kurang Aliran material terhambat	Produk tidak terbentuk sempurna	Meningkatkan temperatur Menambah tekanan injeksi Memperbesar gate
Weld line adalah garis sambungan yang terbentuk ketika dua aliran material bertemu namun tidak menyatu sempurna.	Temperatur material rendah Kecepatan injeksi rendah Desain aliran buruk	Kekuatan lokal menurun Tampilan produk buruk	Temperatur lebih tinggi Desain gate lebih baik Kecepatan injeksi ditingkatkan
Burn mark adalah perubahan warna kehitaman akibat udara terkompresi dan terbakar di dalam mold	Ventilasi buruk Temperatur terlalu tinggi Kecepatan injeksi terlalu cepat	Penampilan buruk Material melemah	Venting lebih baik Mengurangi temperatur Menurunkan kecepatan injeksi
Bubble: gelembung gas pada permukaan atau bagian dalam produk	Kelembaban material Gas terjebak Pendinginan cepat	Gelembung	Pengeringan material Venting mold

Jenis Cacat	Penyebab	Dampak	Pencegahan
Delamination: pengelupasan lapisan material akibat ikatan antar lapisan lemah	Kontaminasi material Temperatur tidak sesuai Material tidak kompatibel	Kekuatan turun drastis	
Jetting : pola aliran seperti ular pada permukaan produk akibat material masuk terlalu cepat	Kecepatan injeksi terlalu tinggi Posisi gate kurang tepat	Permukaan tidak halus	Mengurangi kecepatan injeksi Mendesain ulang gate

Sumber: Crawford (1998); Smith (2016)

BAB 8
MATERIAL KOMPOSIT

Perkembangan ilmu dan teknologi material telah membawa dampak signifikan dalam berbagai aspek kehidupan manusia, mulai dari industri manufaktur, konstruksi, otomotif, hingga teknologi kedirgantaraan. Salah satu pencapaian penting dalam bidang ini adalah pemanfaatan material komposit sebagai alternatif unggul terhadap bahan dasar seperti logam dan keramik.

Material komposit merupakan material rekayasa yang tersusun dari dua atau lebih material berbeda yang digabungkan secara makroskopik untuk menghasilkan sifat baru yang lebih unggul dibandingkan masing-masing penyusunnya secara individual. Namun, secara umum, material komposit terdiri atas matriks sebagai pengikat utama dan penguat (*reinforcement*) yang berfungsi meningkatkan kekuatan, kekakuan, ketahanan aus, maupun sifat termal material. Kombinasi kedua fase tersebut menghasilkan material dengan karakteristik yang dapat dirancang sesuai kebutuhan aplikasi teknik modern (Cwala, 2012); (Hyer, 2009).

Perkembangan teknologi industri mendorong kebutuhan terhadap material yang memiliki rasio kekuatan terhadap berat tinggi, tahan korosi, serta memiliki performa mekanik yang baik pada kondisi operasi ekstrim.

Pada konteks tersebut, material komposit menjadi salah satu solusi utama karena mampu menggantikan material konvensional seperti baja, dan aluminium pada berbagai aplikasi teknik, industri penerbangan, otomotif, maritim, konstruksi, energi, dan biomedis merupakan sektor yang banyak memanfaatkan material komposit karena keunggulannya dalam efisiensi massa dan daya tahan struktural (Cwala, 2012).

Berdasarkan jenis matriksnya, material komposit dibedakan menjadi komposit matriks polimer (*Polyemr Matrix Composit*/PMC), komposit matriks logam (*Metal Matrix Composit*/MMC), dan komposit matriks keramik (Ceramic Matrix Composit.CMC).

Komposit matriks polimer merupakan jenis yang paling banyak digunakan karena ringan, mudah diproses, dan memiliki biaya produksi relatif rendah. Sementara itu, komposit matriks logam dan keramik digunakan pada aplikasi temperatur tinggi yang membutuhkan kekuatan dan ketahanan aus yang lebih baik (Ghom, 2015).

Penguat dalam material komposit dapat berbentuk penguat serat, partikel, whisker, maupun lapisan. Komposit berpenguat serat menjadi jenis yang paling populer karena memiliki sifat mekanik unggul, terutama dalam meningkatkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas. Serat yang umum digunakan antara lain serat kaca, serat karbon, aramid, dan serat alam seperti serat kenaf, rami, bambu, dan lontar. Beberapa tahun terakhir, penggunaan serat alam semakin berkembang karena bersifat ramah lingkungan, biodegradable, ringan, serta berasal dari sumber daya terbarukan (Brown, 1988).

Selain keunggulan mekanik, pengembangan material komposit juga diarahkan pada aspek keberlanjutan (sustainability). Penggunaan serat alam sebagai penguat komposit menjadi perhatian penting dalam penelitian

modern karena dapat mengurangi ketergantungan terhadap serat sintetis yang sulit terurai.

Komposit berbasis serat alam menunjukkan potensi besar dalam aplikasi otomotif, panel bangunan, furnitur, dan produk teknik ringan lainnya. Namun demikian, tantangan seperti sifat hidrofobik matriks dan hidrofilik serat alam, Penyerapan kelembapan, serta variasi kualitas serat masih menjadi fokus penelitian hingga saat ini (Hill *et al*., 1998).

Kemajuan teknologi manufaktur turut mempercepat perkembangan material komposit vacuum infusion, compression molding, resin transfer molding, dan additive manufacturing telah digunakan untuk menghasilkan komposit dengan kualitas dan efisiensi produksi yang lebih baik. Pengendalian orientasi serat, fraksi volume penguat, dan kualitas ikatan antarmuka matriks-penguat menjadi faktor utama dalam menentukan performa akhir material komposit (Callister, 2010).

Dengan berbagai keuggulan tersebut, material komposit dipandang sebagai material masa depan yang mampu memenuhi tuntutan industri modern terhadap material yang ringan, kuat, efisien, dan berkelanjutan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai konsep dasar, klasifikasi, sifat, proses manufaktur, serta aplikasinya menjadi sangat penting dalam pengembangan ilmu material dan rekayasa teknik.

8.1 Definisi Material Komposit

Material komposit merupakan jenis material yang dirancang dan dibentuk dari dua atau lebih jenis material yang berbeda secara maksroskopik yang digabungkan untuk mendapatkan sifat mekanik, fisik, kimia, atau termal yang lebih unggul dibandingkan dengan masing-masing material ketika berdiri sendiri. Umumnya, komposit terdiri dari dua komponen utama, yaitu matrks dan penguat. Matriks

berperan sebagai pengikat dan pelindung bagi penguat, sedangkan pengikat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kekuatan dan kekakuan material tersebut (Cwala, 2012),(Callister, 2010).

Secara stuktur, material komposit terdiri dari:

1. **Matriks (Matrix)**
    - Berfungsi mengikat seluruh komponen komposit.
    - Menyalurkan beban ke penguat.
    - Melindungi penguat dari kerusakan lingkungan.
    - Matriks dapat berupa polimer, logam, maupun keramik.
2. **Penguat (*Reinforcement*)**
    - Memberikan kekuatan dan kekakuan utama.
    - Dapat berupa serat, partikel, whisker, atau lamina.
    - Serat kaca, serat karbon, dan serat alam merupakan jenis penguat yang umum digunakan.
3. ***Interface*/Interphase**
    - Merupakan daerah penghubung antara matriks dan penguat.
    - Sangat menentukan efektivitas transfer tegangan dan performa mekanik komposit.

Perkembangan terbaru, penggunaan serat alam sebagai penguat bio-komposit semakin meningkat karena bersifat ramah lingkungan, biodegradable, ringan, dan memiliki biaya produksi rendah. Serta alam seperti kenaf, rami, bambu, dan lontar telah menjadi alternatif penting pengganti serat sintetis pada berbagai aplikasi rekayasa modern.

Beberapa karakteristik utama material komposit meliputi:

- Kekuatan spesifik tinggi
- Massa jenis rendah
- Ketahanan korosi baik
- Ketahanan fatik tinggi
- Sifat dapat direkayasa sesuai kebutuhan
- Stabilitas dimensi baik
- Ketahanan termal dan kimia tertentu lebih unggul dibanding material konvensional.

Material komposit tersusun dari dua komponen utama: matriks dan penguat (*reinforcement*). Kombinasi kedua komponen ini memungkinkan terciptanya material dengan karakteristik mekanik, termal, dan kimia yang ungguk dibandingkan komponen dasarnya. Untuk memahami performa komposit secara menyeluruh, penting untuk mengkaji struktur internal serta jenis dan karakteristik penguat yang digunakan.

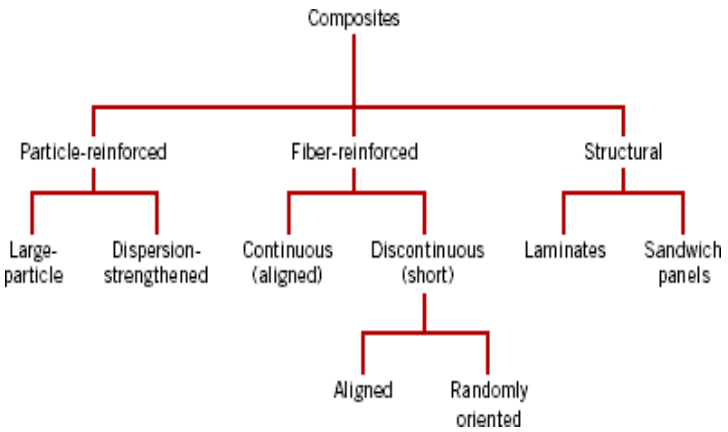
Material komposit dapat dibagi dua kelompok besar, yaitu komposit buatan dan komposit alam. Komposit buatan adalah material komposit hasil buatan manusia untuk memperoleh material yang lebih baik, contohnya kayu lapis, tembok (gabungan dari pasir, semen, batu bata) dan lain-lain. Sedangkan material komposit alam adalah komposit yang tersedia di alam seperti kayu yang dikelilingi oleh serat selulosa yang kuat dan fleksibel serta diikat bersama-sama oleh material yang lebih kaku yang dikenal dengan lignin. Contoh material komposit alam yang alin adalah tulang yang tersusun oleh protein kolagen dan mineral (Dominguez *et al*., 2025).

Sebagian besar komposit tersusun oleh dua bagian, yaitu matriks (*matrix*) dan partikel yang terikat (*dispersed phase*). Matriks adalah bagian yang berfungsi sebagai penguat partikel yang terikat. Sifat komposit ditentukan oleh sifat bagian-bagian penyusunnya, jumlahnya, dan bentuk geometri dari partikelnya (Dominguez *et al*., 2025). Bentuk geometri dari pertikel dapat didefinisikan sebagai bentuk dan ukuran partikel, distribusi, dan orintasi.

Material komposit adalah material yang tersusun dari dua atau lebih komponen berbeda secara makroskopik untuk membentuk material baru dengan sifat yang lebih baik. Komposit terdiri dari:

- **Matriks**: bahan pengikat (biasanya resin polimer)
- **Penguat**: bahan penahan seperti serat kaca, karbon, atau serat alam (Hull & Clyne, 1996).

Klasifikasi material komposit secara garis besar diperlihatkan pada gambar 8.1 di bawah ini.



Gambar 8. 1 Klasifikasi Komposit (Cwala, 2012)

Berikut ini merupakan sifat yang harus ada pada material komposit:

a. Bahan komposit memiliki kepadatan yang jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan bahan-bahan biasa. Hal ini berpengaruh signifikan dalam penggunaannya, karena komposit menawarkan kekuatan dan kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan tradisional. Selain itu, produk komposit yang dibuat memiliki tingkat penyusutan yang lebih rendah dibandingkan logam. Pengurangan berat menjadi salah satu hal penting dalam sektor otomotif dan penerbangan. Ini berkaitan langsung dengan efisiensi bahan bakar sehubungan dengan beban dan desain.
b. Di sektor penerbangan, ada kecenderungan untuk mengganti komponen berbahan logam dengan komposit karena komposit, terutama yang terbuat dari serat karbon, memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kelelahan.
c. Material komposit juga memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas, yaitu produk yang dapat mengombinasikan karakteristik menarik yang bisa diperoleh dengan memodifikasi jenis matriks dan serat yang diterapkan. Sebagai contoh, dengan mencampurkan beberapa serat bersama matriks untuk menciptakan komposit hibrid.
d. Bahan yang membentuk komposit ditentukan oleh sifat bahan penyusunnya sehingga akan berhubungan secara proporsional.
e. Struktur dan bentuk dari bahan akan memengaruhi sifat komposit.
f. Hubungan antara penyusun, Jika ada interaksi di antara penyusun, hal ini akan memperbaiki sifat komposit (Jones, 2018).

Kelebihan Material Komposit:

a. Massa jenis rendah (ringan)
b. Perbandingan kekuatan dan berat yang menguntungkan
c. Lebih kuat (stiff), ulet (tough) dan tidak getas
d. Koefisien pemuaian yang rendah
e. Tahan terhadap cuaca
f. Tahan terhadap korosi
g. Mudah diproses (dibentuk)

Sedangkan Kekurangan Bahan Komposit yang telah diketahui adalah sebagai berikut :

a. Tidak mampu menahan tekanan kejut dari logam.
b. Rendah tingkat elastisitasnya.
c. Sulit untuk dibentuk dengan cara plastis.
d. Aspek harga juga memiliki peranan yang sangat signifikan dalam mendukung pertumbuhan industri material komposit. Harga yang terkait erat dengan proses pembuatan suatu produk seharusnya mempertimbangkan berbagai hal seperti biaya bahan baku, proses produksi, tenaga kerja, dan lain-lain.

Pada bahan material Komposit Serat (*Fibrous Composites*) terdiri dari Matriks dan Filler, berikut penjelasannya:

a. Dalam material komposit, fase yang paling banyak volumenya adalah matriks.

   Matriks memiliki beberapa peran penting, di antaranya:

   1) Mengalihkan beban ke serat.
   2) Membangun ikatan kuat antara matriks dan serat.
   3) Melindungi serat dari kemungkinan kerusakan.

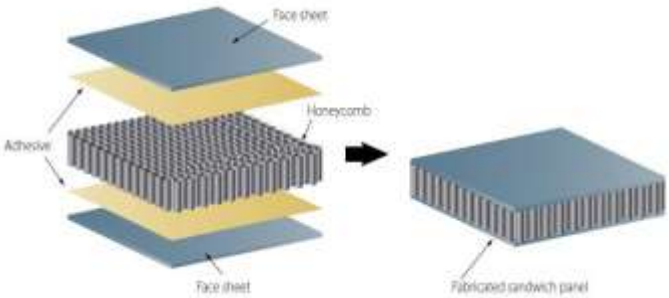
4) Menjaga agar serat tidak saling bersentuhan.
5) Memfasilitasi pemisahan ikatan.
6) Menjamin stabilitas bentuk setelah proses pembuatan selesai (Jones, 2018).

b. Filler, yang merupakan komponen penting dalam komposit, berfungsi sebagai penguat yang mendukung struktur utama dari komposit tersebut.

Secara struktur mikro material komposit tidak merubah material pembentuknya dalam orde kristalin) tetapi secara keseluruhan material komposit berbeda dengan material pembentuknya karena terjadi ikatan antar permukaan antara matriks dan filler. Syarat terbentuknya komposit: adanya ikatan permukaan antara matriks dan filler.

Penggunaan bahan komposit sangat luas dan dapat digunakan dalam berbagai macam bidang dalam kehidupan sehari – hari atau dalam bidang khusus, antara lain :

a. Kedirgantaraan: Komponen pesawat terbang, Komponen Helikopter, Komponen satelit, dll.
b. Automobile: Komponen mesin, Komponen kereta
c. Industri Pertahanan: Komponen jet tempur, Peluru, Komponen kapal selam
d. Industri Perancangan/Konstruksi: Jembatan, Terowongan, Rumah, Tanks.
e. Marine / Kelautan: Kapal Komersil



Gambar 8. 2 Komposit (*Science and Education Publishing*)

8.2 Jenis-Jenis Material Komposit

Berdasarkan jenis matriksnya, material komposit dibagi menjadi:

***Polymer Matrix Composite* (PMC)/ Composite Matriks Polimer**: Paling umum digunakan karena ringan, murah, dan mudah diproses. Terbagi menjadi:

- *Termoplastik* (misal: PP, PEEK): material ini dapat dicetak ulang.
- *Termoset* (misal: epoxy, poliester): kuat dan tahan panas, tapi tidak dapat dicairkan ulang.
- Menggunakan matriks polimer seperti epoxy, polyester, atau polypropylene. Jenis ini paling luas digunakan karena ringan dan mudah diproses. (Mallick, 2007).

***Metal Matrix Composite* (MMC)/ Komposit Matriks Logam**: Digunakan dalam *Metal Matrix Composites (MMC)* untuk aplikasi suhu tinggi. Contohnya aluminium diperkuat dengan serat boron atau SiC. tahan suhu tinggi, kaku, dan kuat.

Menggunakan logam sebagai matriks, misalnya aluminium atau magnesium, dengan penguat keramik atau serat.

***Ceramic Matrix Composite* (CMC)/ Komposit Matriks Keramik**: Menggunakan matriks keramik untuk aplikasi temperatur tinggi dan ketahanan aus tinggi. sangat tahan aus dan cocok untuk suhu ekstrem. Untuk aplikasi ekstrem seperti pesawat luar angkasa dan turbin. Kuat pada suhu tinggi, tapi getas. Contoh: CMC (*ceramic matrix composite*) berbasis alumina atau silikon karbida. (Mallick, P. K. (2007), (Strong, A. B. (2006), (Chawla, 2012).

8.3 Keunggulan dan Kekurangan Material Komposit

Keunggulan:

- Berat ringan namun kuat
- Sifat mekanik dapat direkayasa
- Tahan terhadap lingkungan ekstrem (Mallick, 2007)

Kekurangan:

- Sulit didaur ulang
- Biaya produksi relatif tinggi
- Proses fabrikasi lebih kompleks dibanding logam biasa (Strong, 2006).

8.4 Struktur Umum Material Komposit

Struktur material komposit umumnya terbentuk dari:

- Matriks**:** berfungsi sebagai pengikat, pelindung penguat, serta medium distribusi beban.

- Penguat: bahan utama penanggung beban, meningkatkan kekuatan dan kekakuan komposit.

Secara mikrostruktur, komposit dapat diklasifikasikan menjadi:

- Partikulat**:** penguat berbentuk partikel (silikon karbida dalam aluminium).
- Berserat (*fibrous*)**:** penguat berbentuk serat kontinyu atau diskontinu.
- Struktur laminar: lapisan-lapisan material yang direkatkan (contoh: plywood, laminat FRP). (Chawla, K. K. (2012).

8.5 Jenis Penguat dalam Material Komposit

a) Penguat Partikulat

- Berbentuk butiran kecil dan tersebar dalam matriks.
- Digunakan dalam MMC atau PMMC (*polymer-matrix particulate composites*).
- Contoh: aluminium dengan partikel SiC, polimer dengan kaolin atau karbon hitam.

b) Penguat Serat

Serat adalah jenis penguat paling umum dan efektif, dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Serat dibedakan menjadi:

1. **Serat Sintetis**:
    - Serat Kaca (Glass Fiber)
        - Murah, kuat, dan tahan korosi.
        - Digunakan dalam GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*).

- Modulus elastisitas: 70–80 GPa.

- Serat Karbon
  - Sangat kuat, ringan, dan tahan suhu tinggi.
  - Digunakan dalam aerospace, otomotif, dan olahraga.
  - Modulus: hingga 600 GPa.
- Aramid (Kevlar)
  - Sangat tangguh dan tahan impak.
  - Umum digunakan dalam rompi anti-peluru.

2. **Serat Alam**:
   - Terbuat dari bahan nabati: serat rami, kenaf, sabut kelapa, serat nanas.
   - Biodegradable dan terbarukan.
   - Sifat mekanik lebih rendah dari serat sintetis, tetapi lebih ramah lingkungan.
   - Butuh perlakuan kimia untuk meningkatkan adhesi dengan matriks. (Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005)), (Hull, D., & Clyne, T. W. (1996)).

8.6 Orientasi dan Distribusi Penguat

- *Unidirectional*: serat searah → kekuatan maksimal pada arah serat.
- Woven (tenunan)**:** dua arah → lebih tahan terhadap beban multiarah.

- Random/short fiber**:** mudah diproses, tapi kekuatan mekanik lebih rendah.

8.7 *Interface*: Antarmuka Matriks dan Penguat

Kekuatan material komposit sangat tergantung pada kualitas ikatan antara matriks dan penguat (*interface*). Interface memengaruhi:

- Transfer tegangan altar komponen.
- Ketahanan terhadap retak dan delaminasi.
- Stabilitas dimensi dan umur pakai.

Perlakuan permukaan (seperti silanisasi pada serat kaca atau alkalisasi serat alam) diperlukan untuk meningkatkan kompatibilitas kimia dan adhesi altar fase. (Kim, J. K., & Mai, Y. W. (1998)).

8.8 Sifat-Sifat Mekanik Material Komposit

Beberapa sifat penting komposit, yaitu:

- Modulus Young Komposit (Ec)**;** tergantung pada volume frisk dan orients serat.
- Kekuatan Tarik & Tack**;** mengenai rasio serat.
- Ketahanan Impak; tergantung dari jenis serat dan struktur matriks.

Prediksi sifat dapat dihitung menggunakan pendekatan:

- Rule of Mixtures (untuk estimasi modulus)
- Halpin-Tsai equation (untuk penguatan pendek/ acak)
- Material Komposit**:** Material ini terdiri dari dua atau lebih komponen yang berbeda, seperti serat

(penguat) dan matriks (bahan dasar), yang digabungkan untuk mendapatkan sifat yang lebih baik daripada komponen penyusunnya secara individu.

- Penguatan Pendek/Acak**:** Ini merujuk pada jenis penguat yang tidak memiliki orientasi yang seragam atau teratur dalam matriks, melainkan tersebar secara acak atau dalam bentuk serat-serat pendek.
- Prediksi Sifat Elastis**:** Persamaan Halpin-Tsai secara khusus dirancang untuk memperkirakan bagaimana material komposit akan berperilaku di bawah beban, seperti modulus Young (kekakuan) dan kekuatan tarik, yang sangat dipengaruhi oleh keberadaan dan sifat penguat.
- Parameter yang Digunakan**:** Model ini memperhitungkan faktor-faktor seperti rasio aspek serat (panjang terhadap diameter), fraksi volume serat, dan modulus elastisitas dari serat dan matriks.
- Akurasi**:** Model Halpin-Tsai yang dimodifikasi telah menunjukkan akurasi yang tinggi dalam memprediksi sifat tarik pada serat pendek dan acak.

BAB 9
PROSES PEMBUATAN MATERIAL

Teknik Pengolahan Material adalah proses manufaktur yang bertujuan mengubah bahan baku mentah menjadi produk akhir bernilai tambah melalui pemanfaatan prinsip-prinsip fisika dan/atau kimia. Fokus utama dari metode ini terletak pada rekayasa struktur makro material, yakni pengubahan bentuk fisik secara langsung tanpa harus mengubah komposisi atomik hingga skala nano. Beberapa contoh aplikasi klasik dari pendekatan ini antara lain: pengecoran logam, di mana logam cair dituangkan ke dalam rongga cetakan untuk membentuk komponen padat sesuai geometri yang diinginkan; ekstrusi polimer, yaitu proses mendorong lelehan plastik melewati suatu cetakan (die) untuk menghasilkan profil panjang seperti pipa, selang, atau lembaran; serta sintering keramik, yaitu teknik pemadatan serbuk keramik melalui pemanasan pada suhu di bawah titik lebur sehingga partikel-partikel menyatu membentuk massa yang padat dan kuat.

Tujuan utama penerapan metode transformasi ini adalah untuk meningkatkan efisiensi produksi secara keseluruhan, memperbaiki kualitas dan konsistensi produk akhir, serta menekan konsumsi energi yang diperlukan selama proses berlangsung. Hal ini sangat relevan dalam konteks industri manufaktur modern yang menuntut optimalisasi sumber daya dan pengurangan limbah. Namun, keberhasilan proses tersebut sangat bergantung pada

ketepatan dalam pemilihan material awal. Untuk kebutuhan yang bersifat khusus—misalnya aplikasi di ruang angkasa, peralatan medis, atau komponen otomotif berkinerja tinggi—pemilihan material tidak dapat dilakukan secara sembarangan. Menurut Chung (2006), dalam upaya menentukan material yang paling sesuai untuk suatu aplikasi spesifik, para insinyur dan peneliti biasanya melakukan berbagai pendekatan ilmiah. Pendekatan tersebut mencakup serangkaian uji coba acak (*random trial*) berulang kali guna mengeksplorasi perilaku material di bawah kondisi yang berbeda, penelitian sistematis melalui studi literatur dan eksperimen laboratorium, serta metode-metode lain yang berbasis pada prinsip-prinsip keilmuan seperti analisis statistik, simulasi komputer, dan pengujian karakterisasi material (misalnya uji tarik, uji kekerasan, atau mikroskopi). Dengan demikian, proses seleksi material menjadi langkah kritis yang tidak terpisahkan dari keseluruhan metode transformasi material mentah menjadi produk jadi.

Secara umum proses pembuatan material dikategorikan menjadi pengolahan dan perekayasaan material. Pengolahan materia merupakan caraa yang dipakai untuk mengubah material sedangkan rekasaya material adalah desain/modifikasi material untuk mencapai sifat spesifik dengan mengontrol struktur mikro/nano. Contohnya: menambahkan karbon pada baja untuk kekerasan, mengembangkan *shape-memory alloys* (logam "pintar" yang kembali ke bentuk awal), atau nanomaterial TiO_2 untuk katalis ramah lingkungan. Pendekatannya multidisiplin (gabungan kimia, fisika, teknik) guna menciptakan material inovatif untuk aplikasi medis, energi, atau elektronik (Ashby, *et al*, 2013). Secara umum antara pengolahan dan rekayasa material keduanya saling melengkapi: rekayasa material menentukan *sifat yang diinginkan*, teknik pengolahan mewujudkannya secara efisien (Hasibuan *et al.*, 2025). Pada bab sebelas ini akan dibahas terkait dengan teknik

pengolahan dan rekayasa material yang disajikan dalam dua subbab.

9.1 Pengolahan Material

Secara konseptual, pengolahan material dapat didefinisikan sebagai serangkaian metode dan teknik yang diterapkan untuk mengubah atau mentransformasikan material mentah (misalnya bijih logam, pasir silika, atau serbuk polimer) maupun material setengah jadi (seperti billet, slab, atau ingot) menjadi produk akhir yang memiliki nilai guna dan bentuk tertentu. Proses transformasi ini memanfaatkan prinsip-prinsip fisika (seperti perubahan wujud, deformasi plastis, atau difusi atom) maupun kimia (seperti reaksi reduksi-oksidasi, polimerisasi, atau pembentukan senyawa antarmuka). Keberhasilan pengolahan material sangat ditentukan oleh pemilihan teknik yang sesuai dengan karakteristik material awal serta spesifikasi produk yang diinginkan.

9.1.1 Peleburan dan Pengecoran

Peleburan atau *smelting* merupakan tahap fundamental dalam metalurgi ekstraktif yang bertujuan menghasilkan logam dalam fasa cair dari bijih alamnya melalui serangkaian reaksi reduksi kimia berlangsung pada temperatur sangat tinggi, umumnya melebihi 1500°C, di dalam tungku khusus seperti tanur tiup (*blast furnace*) yang banyak digunakan untuk bijih besi atau tanur listrik (*electric arc furnace*) untuk bijih logam non-ferrous seperti aluminium dan tembaga. Dalam proses ini, bijih logam—misalnya hematit (Fe_2O_3) sebagai sumber besi atau bauksit ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$) untuk aluminium—dipanaskan secara bersamaan dengan reduktor padat berupa kokas atau karbon yang berfungsi mengikat oksigen dari bijih, serta fluks seperti batu

kapur ($CaCO_3$) yang bereaksi dengan pengotor silika membentuk terak (*slag*) cair sehingga dapat dipisahkan. Hasil akhir peleburan adalah logam cair relatif murni, seperti besi tuang (*pig iron*) atau aluminium cair, yang kemudian langsung memasuki tahap pengecoran (*casting*) (Groover, 2022).

Pengecoran sendiri adalah proses menuangkan logam cair tersebut ke dalam rongga cetakan (*mold*) yang telah dirancang sesuai geometri produk akhir; cetakan dapat dibuat dari berbagai material tergantung kebutuhan: pasir cetak (*sand casting*) untuk komponen besar dengan toleransi rendah, cetakan logam permanen (*die casting*) untuk produksi massal dengan akurasi tinggi, atau cetakan keramik (*investment casting* atau *lost-wax casting*) untuk komponen kompleks berdimensi teliti seperti bilah turbin. Setelah logam cair membeku dan mendingin hingga mencapai suhu ruang, produk cor dikeluarkan dari cetakan kemudian menjalani proses *finishing* yang meliputi pemotongan sistem saluran turun (*gating system*), pembersihan permukaan dari sisa pasir atau kerak oksida, penggerindaan (*grinding*) untuk menghilangkan ketidakrataan, serta tidak jarang dilanjutkan dengan perlakuan panas (*heat treatment*) seperti *annealing* atau *quenching-tempering* guna memperbaiki struktur mikro dan meningkatkan sifat mekanis seperti kekerasan, keuletan, atau ketahanan fatik. Perkembangan teknologi modern turut mendorong efisiensi dan kualitas produk cor, misalnya melalui pengecoran presisi (*precision casting*) yang mampu menghasilkan bentuk *near-net shape* dengan sedikit kebutuhan pemesinan lanjutan, serta simulasi aliran logam cair berbasis komputer (*mold flow simulation*) yang memungkinkan peramalan cacat seperti porositas, aliran dingin, atau *shrinkage* sebelum cetakan riil dibuat.

Berkat kemajuan tersebut, produk cor berbasis peleburan dan pengecoran kini menjadi tulang punggung berbagai sektor industri strategis, mulai dari otomotif (blok mesin, kepala silinder, rumah transmisi), kedirgantaraan (komponen turbin, rangka sayap), hingga konstruksi (kolom baja cor, fitting pipa) (Callister and Rethwisch, 2020).



Gambar 9. 1 Pengecoran Logam

(Sumber: Admin, 2017)

9.1.2 Pembentukan Logam

Pembentukan logam (*metal forming*) merupakan salah satu kategori utama dalam proses manufaktur yang mengubah geometri logam padat melalui deformasi plastis permanen, yaitu dengan menerapkan gaya eksternal yang menghasilkan tegangan internal melampaui titik luluh (*yield strength*) material, sehingga logam mengalir secara terkontrol tanpa terjadi penghilangan material yang berarti—berbeda dengan proses pemesinan seperti pembubutan atau pengeboran

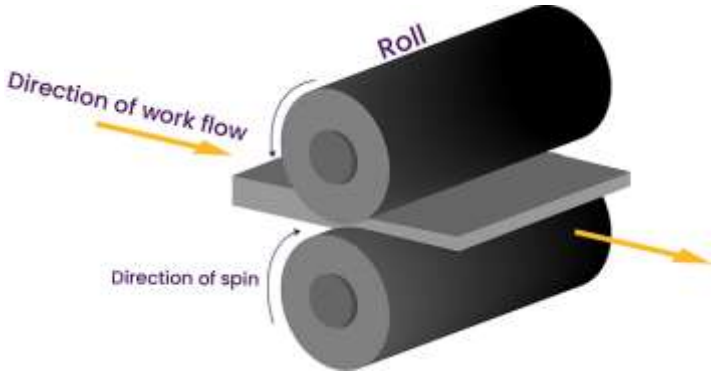
yang memotong dan membuang serpihan. Proses ini secara garis besar terbagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan skala deformasi dan bentuk produk yang dihasilkan. Kelompok pertama adalah pembentukan volume besar (*bulk forming*), yang melibatkan deformasi tiga dimensi dengan regangan tinggi dan perubahan penampang yang signifikan; teknik-teknik dalam kelompok ini meliputi penempaan (*forging*), di mana logam dipukul atau ditekan di antara dua cetakan untuk membentuk komponen kuat seperti poros engkol dan roda gigi; ekstrusi (*extrusion*), yaitu memaksa billet logam melewati lubang cetakan (*die*) untuk menghasilkan profil panjang seperti pipa, rel, atau bentuk kompleks lainnya; serta penarikan kawat (*wire drawing*), yang menarik batang logam melalui serangkaian cetakan yang semakin mengecil untuk menghasilkan kawat berdiameter halus dengan akurasi tinggi.

Kelompok kedua adalah pembentukan pelat (*sheet forming*), yang bekerja pada material lembaran tipis dengan ketebalan relatif seragam dan regangan yang lebih terkontrol; teknik populer dalam kelompok ini mencakup *deep drawing* (pembentukan cekung seperti badan kaleng atau tangki bahan bakar), *bending* (pembengkokan sudut seperti siku-siku profil), dan *stamping* (pencetakan cepat untuk komponen bodi mobil atau panel elektronik). Keberhasilan proses pembentukan logam sangat bergantung pada sejumlah faktor kritis, antara lain sifat alir material (*flow stress*) yang ditentukan oleh kurva tegangan-regangan, kondisi gesekan pada antarmuka perkakas-benda kerja yang mempengaruhi gaya yang dibutuhkan dan kualitas permukaan, desain dan kekuatan perkakas (cetakan dan punch) agar tidak mengalami keausan dini atau kegagalan struktur, laju

deformasi (*strain rate*) yang mempengaruhi pengerasan regangan dan potensi retak, serta kontrol suhu proses yang membedakan antara pembentukan panas (*hot forming*)—yang mengurangi tegangan alir namun dapat menyebabkan oksidasi—dan pembentukan dingin (*cold forming*)—yang menghasilkan kekuatan lebih tinggi melalui *work hardening* namun membutuhkan gaya lebih besar. Dalam praktik modern, simulasi numerik berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*, FEM) telah menjadi standar industri untuk memprediksi secara virtual distribusi tegangan dan regangan, mengidentifikasi cacat potensial seperti kerutan (*wrinkling*) pada pelat, penipisan berlebihan (*necking*) yang mendahului patah, atau lipatan (*folding*) pada tempa, serta mengoptimalkan parameter proses seperti geometri cetakan dan kecepatan deformasi sebelum produksi fisik dimulai—pendekatan ini secara drastis mengurangi waktu *trial-and-error* dan biaya pengembangan. Keunggulan utama pembentukan logam sangatlah signifikan: efisiensi material hampir 100% karena tanpa pembuangan serpihan, peningkatan kekuatan mekanis produk akibat pengerasan regangan (*strain hardening*), kemampuan produksi massal dengan siklus cepat dan konsistensi tinggi, serta kualitas permukaan yang baik sehingga sering tidak memerlukan pemesinan lanjutan. Atas dasar keunggulan-keunggulan tersebut, pembentukan logam menjadi tulang punggung sektor industri strategis, terutama otomotif (komponen mesin, poros, rangka bodi), dirgantara (struktur pesawat, bilah turbin), dan konstruksi (profil baja struktural, fitting sambungan) (Koç and Özel, 2019; Groover, 2022).

Terdapat beberapa variabel yang penting dalam pembentukan logam yaitu (Narayanan and Gunasekera, 2019):

1. Sifat material bahan baku (*billet*) dan perkakas (*tool*);
2. Kondisi antarmuka perkakas/bahan baku seperti pelumas/gesekan dan karakteristik pendinginan;
3. Mekanika deformasi termasuk asumsi pemodelan, evolusi tegangan (*stress*), regangan (*strain*), laju regangan (*strain-rate*), dan suhu;
4. Kondisi peralatan termasuk kapasitas tekanan (*ram tonnage*), kekakuan (*rigidity*), dan akurasi;
5. Kompleksitas produk seperti akurasi dimensi/toleransi, tekstur permukaan, dan sifat struktural; dan
6. Kondisi ekologis termasuk fasilitas manufaktur dan pengendalian.



Gambar 9. 2 Pembentukan Logam

(Sumber: Aprilia, 2023)

9.1.3 Pengelasan dan Penyambungan

Pengelasan serta penyambungan adalah teknik yang juga penting dalam proses pembuatan material yang memungkinkan dua atau lebih bagian material, baik logam maupun non-logam, disatukan secara permanen melalui pembentukan ikatan atomik. Proses ini biasanya

memanfaatkan energi panas, tekanan, atau gabungan keduanya.

Pada pengelasan fusi—yang paling umum ditemui—logam induk dipanaskan hingga meleleh bersama bahan pengisi menggunakan sumber panas seperti busur listrik, laser, atau plasma. Cairan logam yang terbentuk (disebut *molten pool*) kemudian membeku menjadi sambungan yang homogen. Agar tidak terjadi oksidasi selama proses berlangsung, area las dilindungi oleh gas inert seperti argon atau helium, maupun oleh lapisan fluks khusus. Contoh pengelasan fusi yang sering dijumpai antara lain las listrik dengan kawat bersalut (SMAW) dan las busur tungsten dengan gas argon (TIG) (Freire *et al*, 2024). Kemudian pada teknik penyambungan non-fusi seperti pematrian (*brazing*) dan penyolderan (*soldering*) tidak melelehkan logam induk; yang meleleh hanya logam pengisi yang kemudian membasahi permukaan sambungan. Ada pula pengelasan padat seperti *friction stir welding* (pengelasan gesek aduk) yang mengandalkan tekanan dan deformasi plastis tanpa peleburan. Keberhasilan penyambungan sangat ditentukan oleh parameter seperti suhu, laju pendinginan, dan desain sambungan. Kesalahan kontrol dapat menyebabkan cacat seperti porositas, retak, atau distorsi. Teknologi modern seperti las hibrida laser dan kontrol adaptif telah memberikan peningkatan yang lebih presisi serta efisiensi, menjadikan pengelasan sebagai tulang punggung industri otomotif (rangka kendaraan), dirgantara (badan pesawat), hingga pipa tekanan tinggi di sektor energi. Pada akhirnya, kualitas sambungan menjamin integritas mekanik dan ketahanan korosi produk (Öchsner and Altenbach, 2016; Li, 2023).



Gambar 9. 3 Pengelasan Logam

(Sumber: Thangaraj, 2025)

9.1.4 Perlakuan Panas

Bayangkan Anda bisa mengubah sifat sebuah logam—membuatnya lebih lunak, lebih keras, atau lebih tangguh—hanya dengan mengatur suhu dan waktu pemanasannya. Itulah inti dari perlakuan panas, sebuah seni dan ilmu yang sudah dikenal sejak zaman pandai besi dulu. Proses ini mengubah struktur internal logam pada skala atom, yang disebut struktur mikro, tanpa mengubah bentuk fisiknya secara keseluruhan. Pada dasarnya, sebuah logam seperti baja dipanaskan hingga suhu tertentu (misalnya, sekitar 723°C untuk baja karbon) lalu didinginkan dengan cara yang terkendali. Kecepatan pendinginan inilah yang menjadi kuncinya: mendingin cepat dalam air atau minyak akan menghasilkan struktur yang keras namun rapuh (martensit) dalam proses pengerasan (*hardening*). Lalu, untuk mengurangi kerapuhan tersebut, logam yang sudah keras dipanaskan kembali pada suhu yang lebih rendah melalui proses *tempering*. Tentu, tidak hanya

untuk membuat logam keras. Proses anil (*annealing*) justru bertujuan melunakkan logam dengan cara memanaskannya lalu membiarkannya dingin secara perlahan di dalam tungku, sehingga lebih mudah dikerjakan.

Sementara itu, normalisasi (*normalizing*) mirip dengan anil, tetapi menggunakan pendinginan udara di ruang terbuka untuk menghasilkan struktur butiran yang lebih halus dan seragam. Dengan mengombinasikan teknik-teknik seperti anil, pengerasan, temper, dan normalisasi, para ahli metalurgi dapat menyempurnakan logam untuk berbagai kebutuhan, mulai dari pisau dapur yang tajam hingga komponen mesin pesawat yang kuat dan tahan benturan. Teknik utama meliputi: (1) Anil (annealing) untuk melunakkan material, menghilangkan tegangan sisa, dan meningkatkan keuletan dengan pemanasan lambat diikuti pendinginan furnace; (2) Pengerasan (hardening/quenching) yang memanaskan material hingga austenisasi lalu mendinginkannya cepat (dalam air, minyak, atau udara) untuk menghasilkan martensit keras namun getas; (3) Temper (tempering) sebagai lanjutan quenching dengan memanaskan martensit pada suhu 150–650°C untuk mengurangi kekerasan sebagian sekaligus meningkatkan ketangguhan; serta (4) Normalisasi (normalizing) untuk menyempurnakan ukuran butir melalui pemanasan di atas suhu kritis dan pendinginan udara statis. Parameter kritis mencakup suhu pemanasan, waktu tahan (soaking time), media pendingin, dan laju perpindahan panas. Teknologi terkini seperti induction hardening (pengerasan permukaan selektif), cryogenic treatment (stabilisasi struktur dengan pendinginan ekstrem hingga -196°C), dan austempering (pembentukan bainit) memungkinkan presisi kontrol sifat material. Aplikasi

vital meliputi komponen otomotif (poros, gigi transmisi), perkakas potong (mata bor, pisau), dan struktur dirgantara—di mana keseimbangan kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan fatik menjadi kunci kinerja (Thelning, 2013).

Perlakuan panas pada dasarnya bertujuan untuk menyesuaikan sifat-sifat mekanis suatu material—seperti kekerasan, ketangguhan (kemampuan menyerap energi tanpa patah), serta ketahanan terhadap beban berulang atau fatik—agar sesuai dengan kebutuhan spesifik aplikasi di dunia nyata. Penyesuaian sifat ini dapat dilakukan secara merata ke seluruh bagian material (menyeluruh) atau hanya pada area tertentu saja (selektif), tergantung dari metode perlakuan panas yang dipilih. Kemampuan logam, terutama besi, untuk mengalami perubahan sifat yang begitu beragam ini berakar pada fenomena yang disebut alotropi. Alotropi adalah proses termodinamika di mana suatu unsur padat mengubah struktur kisi kristalnya menjadi susunan atom yang berbeda ketika suhu lingkungannya berubah. Pada besi, fenomena alotropi inilah yang menjadi kunci terbentuknya berbagai macam struktur mikro seperti ferit, austenit, atau martensit sehingga memungkinkan para insinyur untuk merekayasa karakteristik logam mulai dari yang sangat lunak hingga super keras hanya dengan mengendalikan pemanasan dan pendinginan. Pada besi murni:

1. Di bawah 912°C: Struktur Body-Centered Cubic (BCC) dikenal sebagai ferit (α-iron), bersifat lunak dan magnetik.
2. 912–1394°C: Struktur Face-Centered Cubic (FCC) disebut austenit (γ-iron), bersifat non-magnetik dengan kelarutan karbon tinggi.
3. Diatas 1394°C: Kembali ke struktur BCC (δ-ferrit) hingga titik leleh 1538°C.

Fenomena alotropi pada logam, terutama besi, membuka peluang bagi para ahli material untuk membentuk berbagai struktur mikro sekunder—seperti martensit (yang keras), bainit (yang tangguh), atau perlit (yang kuat dan ulet)—dengan cara mengatur dua faktor utama: laju pendinginan (seberapa cepat logam didinginkan) dan komposisi kimia logam itu sendiri (misalnya kadar karbon atau unsur paduan lainnya). Kemampuan untuk mengendalikan transformasi ini menjadi landasan ilmiah bagi tiga operasi utama dalam perlakuan panas, yaitu: *quenching* (pendinginan cepat untuk menghasilkan martensit keras), *tempering* (pemanasan ulang martensit agar tidak terlalu rapuh), dan *annealing* (pendinginan lambat untuk melunakkan logam). Dengan kata lain, tanpa pemahaman tentang transformasi alotropik, tidak akan mungkin kita dapat merekayasa sifat logam secara presisi seperti yang dilakukan dalam proses perlakuan panas sehari-hari di industri (M, 2021).



Gambar 9. 4 Perlakuan Panas Pada Material Logam

(Sumber: Said, 2020)

Setiap perlakuan yang diterapkan pada logam akan menyebabkan perubahan pada struktur internalnya. Di antara berbagai jenis perlakuan, proses perlakuan panas memiliki pengaruh yang paling signifikan terhadap struktur mikro logam. Perubahan struktur mikro ini selanjutnya akan mengubah sifat mekanik logam tersebut, salah satu yang paling terlihat adalah perubahan pada tingkat kekerasannya. Dengan kata lain, dengan mengatur perlakuan panas, kita dapat secara langsung mengendalikan seberapa keras atau lunak suatu logam melalui modifikasi struktur mikronya (Yani, Pratomo and Cahyono, 2008). Perubahan pada struktur mikro baja merupakan faktor utama yang menentukan peningkatan kekerasannya. Secara sederhana, semakin banyak kandungan ferit (salah satu fasa dalam baja) dalam struktur mikro, maka baja cenderung semakin lunak dan mudah ditempa karena ferit memang bersifat lunak dan ulet. Sebaliknya, jika struktur mikro baja didominasi oleh perlit, kekerasannya akan meningkat. Perlit sendiri merupakan fasa yang lebih keras karena tersusun dari lapisan-lapisan tipis ferit dan sementit (senyawa besi karbida yang sangat kuat) yang tersusun secara berulang. Karena hubungan inilah, proses perlakuan panas seperti pemanasan hingga suhu tertentu diikuti pendinginan yang terkendali digunakan untuk mengatur perbandingan dan persebaran fasa-fasa mikro seperti ferit dan perlit. Dengan cara tersebut, tingkat kekerasan pada logam yang mendapatkan perlakuan sesuai dengan yang diinginkan pada baja dapat dicapai secara presisi (Masriatini *et al.*, 2025).

Tabel 9. 1 Pengujian Kekerasan Rockwell C Setelah Dilakukan Perlakuan Panas

Diskripsi	Spesimen	Nilai Kekerasan					Kekerasan rata-rata
Benda yang telah dipakai	1	52,6	52,6	52,1	52,1	53,1	52,7
Benda hasil tempa	1	44,6	45,6	44,1	44 ,1	45,6	44,8
Temperatur 810°C	1	43,6	45,6	41,6	50,6	51,6	46,6
Temperatur 820°C	1	48,6	50,6	48,6	52,6	51,6	50,4
Temperatur 830°C	1	55,6	55,6	53,1	51,6	55,6	54,3
Temperatur 840°C	1	59,6	61,6	54,6	58,6	56,6	58,2
Temperatur 850°C	1	58,6	61,6	61,6	62,6	64,6	61,8

Sumber: (Fatoni, 2016)

9.2 Perekayasaan Material

Pernahkah Anda membayangkan bagaimana logam pesawat terbang bisa begitu kuat namun tetap ringan, atau bagaimana tulang buatan dapat menyatu dengan tubuh manusia tanpa ditolak? Jawabannya terletak pada sebuah disiplin ilmu yang disebut Rekayasa Material. Ilmu ini ibarat "koki spesialis" yang meracik dan memasak material dari tingkat atom hingga menjadi produk jadi, dengan menggabungkan pengetahuan dari kimia, fisika, dan teknik (terutama mekanika). Tugas utamanya bukan sekadar memahami material yang sudah ada, tetapi merancang dan menciptakan material baru yang memiliki sifat-sifat unggul—

misalnya sangat kuat, sangat ringan, tahan karat, tahan panas ekstrem, atau mampu menghantarkan listrik dengan efisien.

Inti dari rekayasa material adalah hubungan segitiga: **struktur → sifat → kinerja**. Struktur material diamati dari skala atom (susunan elektron), mikro (butiran kristal), hingga makro (bentuk kasat mata). Struktur inilah yang menentukan sifat material, seperti kekerasan, kelenturan, konduktivitas, atau ketahanan kimia. Selanjutnya, sifat-sifat tersebut akan menentukan bagaimana material berperilaku atau "berkinerja" saat dipakai dalam aplikasi nyata, misalnya sebagai bilah turbin pesawat atau cangkang baterai ponsel. Rekayasa material mencakup berbagai kelas material: logam (baja, aluminium), keramik (ubin, isolator), polimer (plastik, karet), komposit (gabungan dua material berbeda), serta material fungsional seperti semikonduktor (silikon untuk chip) dan biomaterial (implan gigi). Untuk membuat material dengan sifat yang diinginkan, para insinyur melakukan berbagai modifikasi. Misalnya, **modifikasi mikrostruktur** dengan mengatur pemanasan dan pendinginan logam agar butiran-butiran kristalnya tersusun rapi sehingga lebih keras. Atau, memanfaat-kan **nanoteknologi** mereka mengatur partikel berukuran satu per miliar meter sehingga material dapat memiliki sifat yang sangat aneh, seperti katalis yang mampu membersihkan polusi hanya dengan sinar matahari. Lalu ada **material cerdas** (*smart materials*), seperti paduan yang "mengingat" bentuk asalnya saat dipanaskan (shape memory alloy) atau fluida yang mengeras ketika dialiri listrik. Sementara itu, **komposit** menyatukan kekuatan serat karbon dengan kelenturan resin epoksi untuk menghasilkan bahan yang lebih kuat dan ringan dari baja, namun sekering busa. Dengan pendekatan interdisipliner ini, rekayasa material menjadi kunci solusi inovatif bagi berbagai tantangan teknologi masa

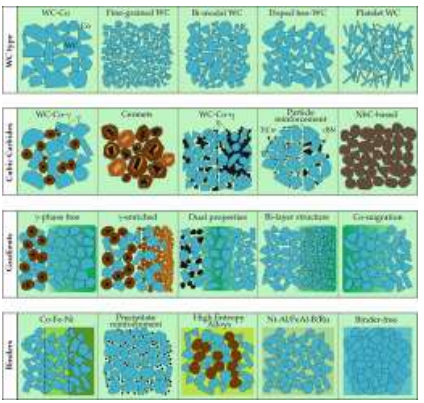
depan—mulai dari transportasi yang lebih hemat energi, perangkat medis yang lebih aman, hingga sumber energi terbarukan yang lebih efisien

Rekayasa material merupakan cabang ilmu yang bersifat interdisipliner, menggabungkan dasar-dasar kimia, fisika, serta teknik (terutama mekanika) untuk merancang, mengembangkan, memproses, menguji, dan mengaplikasikan material-material baru sekaligus menyempurnakan material yang sudah ada. Landasan utamanya terletak pada pemahaman tentang hubungan erat antara struktur material—yang diamati dari skala atom hingga tampak mata—dengan sifat-sifat yang dimilikinya (misalnya sifat mekanik, termal, listrik, magnetik, optik, maupun kimia), serta bagaimana material tersebut berperforma dalam suatu aplikasi tertentu. Tujuan akhir dari rekayasa material adalah menghasilkan material dengan kombinasi keunggulan, seperti kuat namun ringan, tahan karat, tahan panas, atau memiliki fungsi khusus, guna menjawab kebutuhan teknologi terkini. Bidang ini mencakup berbagai jenis material, antara lain logam, keramik, polimer, komposit, dan material fungsional seperti semikonduktor serta biomaterial.

9.2.1 Perubahan Mikrostruktur

Modifikasi mikrostruktur merupakan serangkaian proses yang dilakukan secara sengaja dan terkendali untuk mengubah berbagai aspek internal suatu material pada skala mikroskopis biasanya dalam ukuran nanometer hingga mikrometer. Aspek yang diubah meliputi susunan, ukuran, bentuk, sebaran, serta sifat-sifat dari fasa-fasa penyusun material. Tujuan utamanya adalah meningkatkan sifat mekanik, fisik, atau kimia material tersebut agar sesuai dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Teknik ini merupakan salah satu fondasi

penting dalam rekayasa material. Berbagai metode dapat digunakan, antara lain: (1) perlakuan panas, yaitu proses pemanasan, penahanan pada suhu tertentu, lalu pendinginan terkontrol seperti quenching (pendinginan cepat), tempering (pemanasan ulang setelah quenching), anil (pendinginan lambat), dan normalisasi; (2) pembentukan mekanis, seperti pengerolan, penempaan, atau ekstrusi, yang menciptakan cacat kristal (dislokasi) dan mengubah bentuk butiran material; (3) pengubahan komposisi kimia, misalnya melalui penambahan unsur paduan, atau proses difusi permukaan seperti karburasi dan nitridasi; serta (4) penggabungan dengan material lain, seperti pada pembuatan komposit atau penyebaran partikel halus ke dalam matriks material (González-Velázquez, 2019).



Gambar 9. 5 Contoh Skema Mikrostruktur

(Sumber: García *et al.*, 2019)

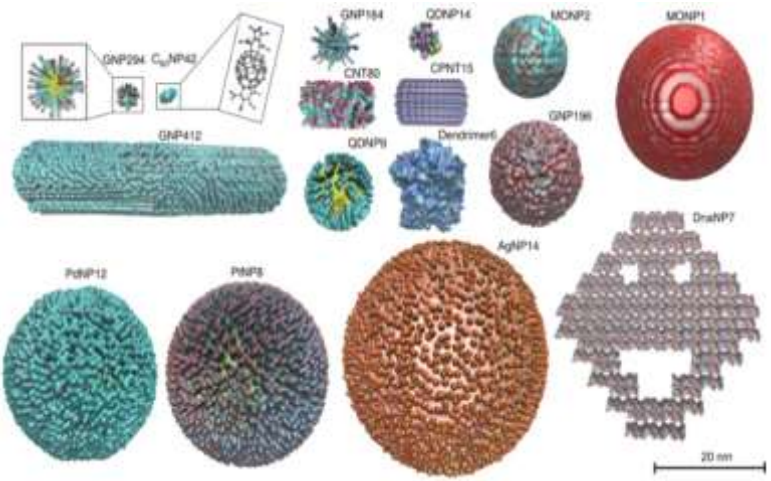
Masing-masing teknik modifikasi mikrostruktur bekerja dengan memengaruhi mekanisme dasar di dalam material, seperti rekristalisasi (pembentukan butir baru tanpa perubahan komposisi), pertumbuhan butir (pembesaran ukuran butir akibat pemanasan), transformasi fasa (misalnya

perubahan struktur kristal dari austenit menjadi martensit atau perlit pada baja), presipitasi partikel penguat (pembentukan butiran kecil yang menghambat pergerakan dislokasi), atau pembentukan batas butir. Hasil akhirnya adalah terbentuknya mikrostruktur yang berbeda dari kondisi awal material. Keberhasilan modifikasi ini sangat bergantung pada pemahaman yang mendalam tentang hubungan timbal balik antara tiga hal: proses yang diterapkan, mikrostruktur yang dihasilkan, dan sifat akhir material. Hubungan ini sering disebut sebagai hubungan proses-struktur-sifat. Untuk memastikan hasil modifikasi sesuai harapan, para ahli material melakukan karakterisasi terhadap mikrostruktur yang telah diubah menggunakan berbagai teknik canggih, seperti mikroskop optik (untuk melihat struktur kasar), mikroskop elektron scanning (SEM) dan transmisi (TEM) untuk detail skala nano, serta difraksi sinar-X (XRD) untuk menganalisis struktur kristal. Aplikasi dari modifikasi mikrostruktur sangat luas, antara lain: mengembangkan baja yang lebih kuat sekaligus tangguh untuk keperluan konstruksi bangunan dan komponen otomotif, menciptakan paduan ringan yang tahan panas untuk industri kedirgantaraan, serta memproduksi semikonduktor dengan kinerja elektronik yang unggul (Totten, 2006; Verhoeven, 2010).

9.2.2 Nanostruktur Material

Nanoteknologi pada material logam merupakan terobosan revolusioner di bidang rekayasa material. Teknologi ini memungkinkan para ilmuwan untuk memanipulasi struktur logam pada skala yang sangat kecil, yaitu antara 1 hingga 100 nanometer (satu nanometer adalah sepermiliar meter). Dengan ukuran sekecil itu, logam dapat menunjukkan sifat-sifat unggul yang tidak pernah dimiliki oleh logam konvensional berukuran besar. Pendekatan utama dalam

nanoteknologi logam meliputi pembuatan logam berbutir nano (*nanocrystalline*), partikel logam berukuran nano, komposit logam skala nano, serta pelapisan nano (*nano-coating*). Untuk membuat material-material ini, para ahli menggunakan dua strategi sintesis. Strategi pertama disebut *bottom-up* (dari bawah ke atas), yaitu membangun struktur nano dari atom atau molekul penyusunnya melalui metode seperti reduksi kimia, sol-gel, deposisi listrik (elektrodeposisi), bahkan sintesis biologis. Strategi kedua adalah *top-down* (dari atas ke bawah), yaitu memperkecil ukuran butir dari logam padat berukuran besar melalui teknik seperti deformasi plastis berat (*severe plastic deformation*)—misalnya ECAP dan HPT—serta penggilingan bola (*ball milling*). Apa yang membuat logam skala nano begitu istimewa? Pada ukuran ini, rasio luas permukaan terhadap volume menjadi sangat besar, dan batas butir (daerah antar kristal) mendominasi struktur internal. Akibatnya, perilaku logam berubah drastis: kekerasan bisa melonjak, titik leleh dapat bergeser, dan reaktivitas kimia meningkat secara signifikan dibandingkan logam biasa.



Gambar 9. 6 Ilustrasi Nano Material

(Sumber: Yan *et al.*, 2020)

Logam dengan struktur berukuran nano umumnya memiliki kekuatan tarik dan kekerasan yang jauh lebih tinggi dibandingkan logam biasa—fenomena ini dikenal sebagai hubungan Hall-Petch. Selain itu, logam nano juga menunjukkan ketahanan terhadap keausan yang sangat baik serta memiliki sifat katalitik atau fungsional yang unik. Sebagai contoh, nanopartikel emas atau perak dapat dimanfaatkan untuk sensor biomedis maupun terapi kanker. Namun, logam nano bukannya tanpa kelemahan. Mereka cenderung mengalami penurunan keuletan (duktilitas) sehingga lebih rapuh, serta rentan terhadap ketidakstabilan termal karena butiran-butiran nano mudah membesar (tumbuh) jika terkena panas. Berbagai aplikasi logam nano telah dikembangkan, antara lain: komponen struktural yang ringan namun kuat untuk industri otomotif dan kedirgantaraan (misalnya paduan aluminium atau titanium nano), katalis yang sangat efisien untuk sektor kimia dan energi,

sensor di bidang biomedis, lapisan pelindung yang tahan aus dan anti karat, serta material penyimpan hidrogen. Meskipun menjanjikan, terdapat beberapa tantangan besar yang masih harus diatasi, yaitu: kemampuan memproduksi dalam skala besar (scalability), pengendalian struktur nano secara presisi, serta mengatasi pertukaran (trade-off) antara kekuatan dan keuletan yang sering kali sulit diraih secara bersamaan (Lu, Lu and Suresh, 2009; Thangadurai *et al.*, 2020).

9.2.3 Material Cerdas



Gambar 9. 7 Contoh Material Cerdas Termokromik (*Themocromic*)

(Sumber: (Olikrom, 2019)

Material cerdas (*smart materials*) adalah jenis material inovatif yang memiliki kemampuan layaknya makhluk hidup: ia bisa "merasakan" perubahan di lingkungan sekitarnya—misalnya perubahan suhu, tekanan, medan listrik atau magnet, cahaya, kelembaban, kadar keasaman (pH), atau zat kimia tertentu—lalu memberikan respons yang terkendali, dapat balik (reversibel), dan signifikan. Respons tersebut dapat berupa perubahan bentuk, kekakuan, kekentalan

(viskositas), daya hantar listrik, atau bahkan warna. Semua ini terjadi karena adanya perubahan struktur internal pada tingkat atom atau molekul.

Beberapa contoh material cerdas yang terkenal antara lain: Paduan Memori Bentuk (misalnya NiTi), yang bisa "mengingat" bentuk aslinya dan kembali ke bentuk itu saat dipanaskan, atau memberikan gaya besar jika deformasinya dihambat (superelastisitas); Material Piezoelektrik (seperti PZT dan kuarsa), yang menghasilkan listrik ketika ditekan, atau berubah bentuk ketika dialiri listrik; Material Magnetostriktif (misalnya Terfenol-D), yang berubah ukuran dalam medan magnet; Fluida Elektro- dan Magnetoreologis, yang kekentalannya berubah drastis secara reversibel saat terkena medan listrik atau magnet; Polimer Responsif (misalnya hidrogel), yang mengembang atau mengerut karena rangsangan spesifik seperti pH atau suhu; serta Material Kromogenik (elektrokromik, termokromik), yang dapat mengubah warna. Aplikasi material cerdas sangat luas, antara lain: aktuator dan sensor presisi (misalnya untuk alat bedah mikro atau injektor bahan bakar), peredam getaran adaptif pada jembatan dan mesin, pemanen energi piezoelektrik (mengubah getaran menjadi listrik), kaca pintar (yang bisa gelap-terang otomatis), sistem penghantaran obat terkendali di dalam tubuh, serta struktur sayap pesawat yang dapat berubah bentuk. Namun, material cerdas masih menghadapi tantangan seperti kelelahan material (khususnya pada paduan memori bentuk), waktu respons yang perlu ditingkatkan, biaya produksi yang mahal, serta kesulitan dalam mengintegrasikannya ke dalam sistem yang ada. Para peneliti terus berupaya meningkatkan kinerja, keandalan, dan kemampuan produksi skala besar dari

material-material cerdas ini (Jani *et al.*, 2014; Hussain and Di Sia, 2022).

9.2.4 Komposit

Material komposit adalah jenis material rekayasa yang dibuat dengan cara menyatukan dua atau lebih bahan penyusun (disebut fase) yang berbeda secara kasat mata (makroskopis). Tujuannya adalah untuk menghasilkan sifat-sifat gabungan yang lebih unggul, yang sering kali tidak dapat dicapai oleh masing-masing bahan tersebut jika berdiri sendiri. Dengan kata lain, komposit memanfaatkan kelebihan setiap komponen penyusunnya sambil menutupi kelemahan masing-masing, sehingga terbentuk material baru dengan performa yang lebih baik.



Gambar 9. 8 Contoh Komposit Besi

(Sumber: Sofia, 2023)

Secara umum, material komposit terdiri dari dua komponen utama. Pertama adalah matriks, yaitu fase yang berkesinambungan (kontinu) yang berfungsi sebagai perekat sekaligus penyalur beban ke seluruh bagian material. Kedua adalah penguat, yaitu fase yang terdispersi atau tidak kontinu, yang memberikan kekuatan, kekakuan, atau sifat fungsional khusus pada komposit. Komposit dapat dikelompokkan berdasarkan

jenis matriksnya misalnya matriks polimer, logam, keramik, atau karbon/karbonatau berdasarkan bentuk penguatnya, seperti partikel (butiran), serat pendek, serat panjang (kontinu), maupun susunan berlapis (laminasi).

Keunggulan utama komposit terletak pada rasio kekuatan terhadap berat dan kekakuan terhadap berat yang sangat tinggi. Selain itu, komposit umumnya tahan terhadap korosi dan kelelahan (*fatigue*), memiliki sifat termal maupun listrik yang dapat direkayasa sesuai kebutuhan, serta bersifat anisotropik (kekuatannya berbeda di setiap arah), yang justru menguntungkan untuk optimalisasi desain. Semua keunggulan ini muncul dari kerja sama antara matriks dan penguat. Matriks melindungi penguat dari lingkungan luar, mendistribusikan beban secara merata, dan menjaga bentuk komposit. Sementara itu, penguat—terutama serat seperti karbon, gelas, aramid, atau keramik—menanggung sebagian besar beban mekanis dan mencegah retak merambat. Proses pembuatan komposit pun beragam: mulai dari teknik *hand lay-up* dan *filament winding* untuk komposit polimer berpenguat serat, hingga infiltrasi logam dan metalurgi serbuk untuk komposit matriks logam, serta infiltrasi uap kimia untuk komposit keramik-keramik. Aplikasi komposit sangat luas, antara lain: struktur ringan pesawat terbang dan kendaraan (badan pesawat, bemper mobil), bilah turbin angin, peralatan olahraga (raket tenis, sepeda), implan ortopedi, komponen elektronik, serta struktur tahan api dan korosi. Meski demikian, komposit masih menghadapi sejumlah tantangan, seperti biaya bahan baku yang mahal (terutama serat karbon), sulit didaur ulang, mudah rusak akibat benturan ringan, serta perlunya kontrol proses manufaktur yang sangat ketat

untuk menjaga kualitas produk (Hull and Clyne, 1996; Low and Dong, 2021).

BAB 10
KARAKTERISASI MATERIAL

10.1 Karakterisasi Material

Untuk memahami material teknik secara mendalam, analisis tidak cukup dilakukan hanya melalui pengamatan visual. Brandon dan Kaplan (2008) menjelaskan bahwa karakterisasi material merupakan suatu proses investigasi ilmiah yang bertujuan mengungkap struktur internal, komposisi kimia, serta keberadaan cacat pada suatu bahan. Melalui pendekatan ini, hubungan antara struktur mikroskopis dan sifat makroskopis material dapat dipahami secara lebih komprehensif.

Sering terjadi kesalahpahaman antara konsep karakterisasi dan pengujian material. Pengujian material, seperti uji tarik (*tensile strength*) atau uji kekerasan (*hardness*), berfokus pada pengukuran respons mekanis suatu bahan terhadap beban eksternal. Di sisi lain, karakterisasi bertujuan menelusuri aspek internal pada skala mikro untuk menjelaskan penyebab dari perilaku mekanis tersebut.

Dalam memahami pentingnya karakterisasi, perlu ditinjau kerangka dasar ilmu material yang dikenal sebagai empat pilar utama yang saling berkaitan, yaitu processing, structure, properties, dan performance. Keempat aspek ini membentuk suatu hubungan sistematis yang menggambarkan keterkaitan antara proses pembuatan,

struktur internal, sifat material, serta kinerjanya dalam aplikasi.

1. Proses pembuatan (*Processing*); bagaimana material dibuat atau direkayasa pada proses produksinya, misal melalui proses : *casting, bending, rolling*, perlakuan panas (*heat treatmen*, dll).
2. Struktur (*Structure*); susunan komponen-komponen internal material yang dapat diamati pada skala atomic, struktur mikro hingga makro.
3. Sifat (*Properties*); karakteristik fungsi setiap material pada saat menerima stimulus dari lingkungan, seperti : konduktivitas listrik, kekuatan mekanis, ketahanan korosi dan sifat-sifat lainnya.
4. Kinerja (*Performace*); seberapa mampu suatu material dapat berfungsi pada komponen atau pada system kerjanya.

Karakterisasi material berperan sebagai penghubung utama dalam hubungan tersebut. Tanpa adanya karakterisasi, sulit bagi seorang insinyur untuk memastikan apakah variasi proses, seperti perlakuan panas, benar-benar memengaruhi struktur mikro material, maupun untuk menganalisis penyebab kegagalan material yang terjadi di lapangan.

Secara garis besar untuk mempermudah pemahaman, metode karakterisasi diklasifikasikan menjadi empat pilar teknik analisis utama sebagaimana ditampilkan pada Tabel 10.1.

Tabel 10. 1 Klasifikasi Metode Karakterisasi

Kategori Analisis	Fokus Utama	Instrumen Standard
Analisis Struktur & Morfologi	Mengamati bentuk permukaan, batas butir, cacat kristal, dan orientasi fasa pada skala mikro hingga nano.	Mikroskopi Optik, SEM, TEM

Kategori Analisis	Fokus Utama	Instrumen Standard
Analisis Struktur Kristal	Mengidentifikasi susunan atom, parameter kisi, dan fasa kristalin atau amorf.	*XRD (X-Ray Diffraction)*
Analisis Komposisi Kimia	Mengetahui jenis unsur atau senyawa kimia penyusun material serta distribusinya.	*EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), EDX (Energy Dispersive X-ray Fluorescence), FTIR (Fourir Transform Infrared Spectroscopy)*
Analisis Termal	Mengukur perubahan sifat fisik dan kimia material sebagai fungsi dari perubahan suhu.	*TGA (Thermogravimetric Analysis , DSC (Differential Scanning Calorimetry)*

10.2 Analisis Struktur & Morfologi Material

Pengamatan pada tingkat makroskopis saja belum memadai untuk menjelaskan perilaku mekanis material teknik secara menyeluruh. Oleh karena itu, diperlukan kajian pada skala mikro hingga nano untuk mengidentifikasi karakteristik seperti ukuran butir, batas antar fasa, serta keberadaan cacat kristal. Kajian ini dikenal sebagai analisis struktur dan morfologi, yang umumnya dilakukan menggunakan berbagai teknik mikroskopi.

Kemampuan sistem pengamatan, baik mata manusia maupun instrumen, dibatasi oleh resolusi yang dapat dicapai. Secara teoritis, batas resolusi tersebut dijelaskan melalui Kriteria Abbe, yang menunjukkan hubungan antara panjang gelombang cahaya dan kemampuan sistem optik dalam membedakan dua objek yang berdekatan.

$$d = \frac{\lambda}{2.NA} \qquad (10.1)$$

Dimana :

λ = panjang gelombang radiasi yang digunakan

NA = numeric apartur lensa

d = batas resolusi

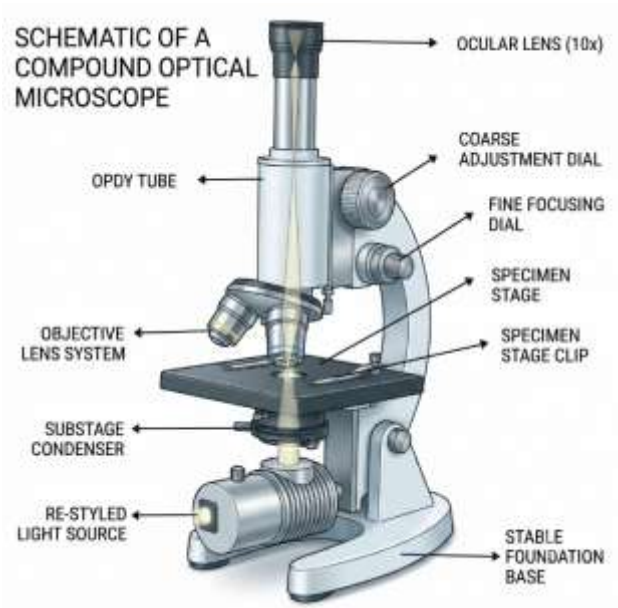
10.2.1 Mikroskopi Optik (*Optical Microscopy* - OM)

Mikroskopi optik merupakan salah satu metode karakterisasi dasar yang digunakan dalam bidang metalurgi dan teknik material. Teknik ini memanfaatkan cahaya tampak dengan panjang gelombang berkisar antara 400 hingga 700 nm serta sistem lensa untuk menghasilkan pembesaran citra permukaan spesimen. Keterbatasan panjang gelombang cahaya menyebabkan daya pisah maksimum metode ini berada pada kisaran 0,2 μm, dengan kemampuan perbesaran efektif mencapai sekitar 1000 hingga 2000 kali.

Sinar cahaya tidak dapat menembus logam (opak), sehingga OM pada material teknik bekerja dengan prinsip refleksi (pantulan cahaya). Agar struktur mikro dapat terlihat, sampel harus melewati tahapan preparasi yang ketat (*metallography*):

1. Pemotongan (*Cutting*): Mengambil bagian sampel tanpa merusak struktur akibat panas berlebih.
2. Pemasangan (*Mounting*): Menempatkan sampel kecil dalam media resin untuk mempermudah penanganan.
3. Pengamplasan & Pemolesan (*Grinding & Polishing*): Mengikis permukaan sampel menggunakan abrasif hingga diperoleh permukaan yang halus mengkilap seperti cermin (*mirror-like finish*).
4. Etsa (*Etching*): Proses etsa berfungsi untuk menonjolkan fitur mikrostruktur melalui pembentukan kontras. Hal ini terjadi karena batas

butir memiliki energi permukaan yang lebih tinggi serta ketidakteraturan struktur atom yang lebih besar dibandingkan bagian dalam butir, sehingga lebih reaktif terhadap larutan etsa. Akibatnya, area tersebut terkikis lebih cepat, menghasilkan perbedaan pantulan cahaya saat diamati di bawah mikroskop, yang kemudian memunculkan visualisasi garis batas butir.



Gambar 10. 1 Mikroskopi Optik

(Sumber : Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., & Joy, D. C., 2017)

10.2.2 *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Ketika ukuran fitur mikrostruktur berada di bawah batas resolusi mikroskop optik (sekitar 0,2 μm), teknik tersebut tidak lagi mampu menghasilkan citra yang tajam. Untuk mengatasi keterbatasan ini, digunakan

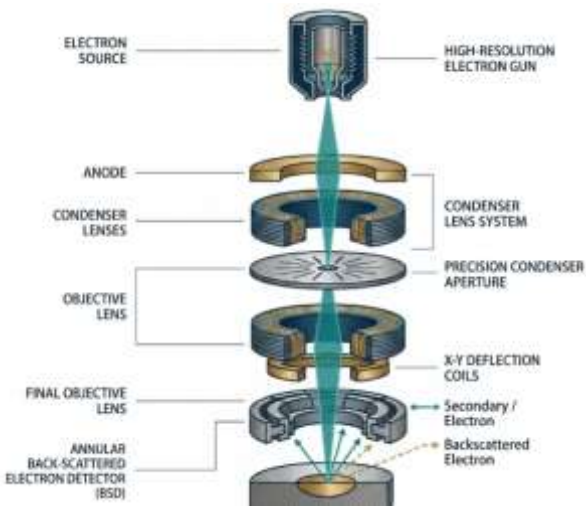
Scanning Electron Microscopy (SEM), yang memanfaatkan berkas elektron berenergi tinggi sebagai pengganti cahaya tampak. Proses ini dilakukan dalam ruang vakum untuk memastikan pergerakan elektron tidak terganggu oleh partikel udara.

Dibandingkan cahaya tampak, elektron memiliki panjang gelombang yang jauh lebih kecil menurut prinsip de Broglie, sehingga memungkinkan pencapaian resolusi yang jauh lebih tinggi, bahkan hingga skala nanometer. Dengan demikian, *SEM* mampu memperbesar citra hingga ratusan ribu kali.

Ketika berkas elektron primer diarahkan ke permukaan sampel, terjadi interaksi kompleks dengan atom-atom penyusun material. Interaksi ini menghasilkan berbagai jenis sinyal, termasuk elektron sekunder, yang kemudian ditangkap oleh detektor dan diolah menjadi citra permukaan dengan detail topografi yang tinggi.

1. **Elektron Sekunder (*Secondary Electrons - SE*):**
    - Asal: Elektron dari kulit atom sampel yang terlempar keluar akibat tabrakan elektron primer. Sinyal ini berasal dari kedalaman yang sangat dangkal (beberapa nanometer dari permukaan).
    - Fungsi: Sangat sensitif terhadap variasi ketinggian permukaan. Sinyal SE digunakan untuk menghasilkan citra Topografi dan Morfologi 3D. Teknik ini sangat vital dalam analisis fraktografi (melihat jenis patahan material, apakah getas atau ulet).

2. **Elektron Pantulan Balik (*Backscattered Electrons - BSE*):**
   - Asal: Elektron primer yang menabrak inti atom sampel dan terpental kembali secara elastis. Sinyal ini berasal dari lapisan yang sedikit lebih dalam.
   - Fungsi: Efisiensi pantulan BSE sangat bergantung pada nomor atom (Z) unsur yang ditabrak. Unsur dengan nomor atom besar (lebih berat) akan memantulkan lebih banyak elektron dan tampak lebih cerah pada layar, sedangkan unsur ringan tampak lebih gelap. Sinyal BSE menghasilkan citra Kontras Komposisi/Fasa.



Gambar 10. 2 Skematik Teknis Untuk *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

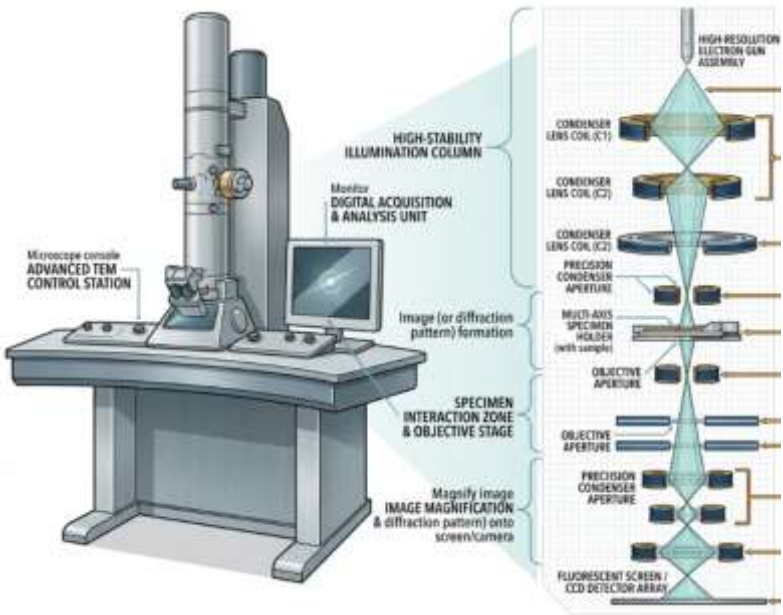
(Sumber : Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., & Joy, D. C., 2017)

10.2.3 *Transmission Electron Microscopy* (TEM)

Transmission Electron Microscopy (*TEM*) merupakan teknik karakterisasi tingkat lanjut yang menawarkan kemampuan observasi paling detail dibandingkan metode mikroskopi lainnya. Jika *SEM* berfokus pada elektron yang dipantulkan dari permukaan, *TEM* bekerja dengan memanfaatkan elektron yang ditransmisikan menembus spesimen.

Agar proses ini dapat berlangsung, elektron dipercepat menggunakan tegangan sangat tinggi, umumnya berkisar antara 200 hingga 300 kV. Selain itu, spesimen harus dipersiapkan dalam bentuk yang sangat tipis, biasanya kurang dari 100 nm, sehingga memungkinkan elektron melewati material tanpa mengalami hambatan signifikan.

Karena panjang gelombang elektron yang sangat kecil, *TEM* mampu mencapai resolusi hingga skala sub-nanometer, sehingga memungkinkan pengamatan susunan atom secara langsung. Dengan kemampuan tersebut, *TEM* menjadi alat yang sangat efektif untuk mengidentifikasi fitur mikrostruktur yang sangat halus, seperti dislokasi, batas kembaran, serta presipitat berukuran nano yang berperan penting dalam mekanisme penguatan material.



Gambar 10. 3 Skematik Teknis Untuk Instrumen *Tranmission Electron Microscopy (TEM)*

(Sumber : Williams, D. B., & Carter, C. B., 2009)

10.2.4 Matriks Perbandingan Instrumen Analisis Struktur & Morfologi

Untuk memudahkan dalam memetakan perbedaan mendasar dari ketiga instrumen di atas, berikut adalah tabel komparasi komprehensifnya:

Tabel 10. 2 Matriks Perbandingan Instrumen Analisis Struktur & Morfologi

Parameter Evaluasi	**Mikroskopi Optik (OM)**	***Scanning Electron Microscopy (SEM)***	***Transmission Electron Microscopy (TEM)***
Sumber Radiasi	Cahaya Tampak (λ ≈ 400-700 nm)	Berkas Elektron Kontinu	Berkas Elektron Tegangan Tinggi
Sistem Lensa	Lensa Kaca / Optik	Lensa Elektromagnetik	Lensa Elektromagnetik
Medium Operasi	Atmosfer Alami (Udara)	Ruang Hampa Udara (*Vacuum*)	Ruang Hampa Udara Tinggi (*High Vacuum*)
Batas Resolusi	≈ 200 nm	≈ 1-5 nm	< 0.1 nm (Skala Atom)
Maksimum Perbesaran	≈ 2.000 x	≈ 300.000 x	> 1.000.000 x
Jenis Informasi	Batas butir makro, inklusi, orientasi fasa kasar.	opografi permukaan 3D (SE) dan variasi fasa kimia (BSE).	Struktur kisi atom, cacat dislokasi, fasa nanostruktur.
Kondisi Sampel	Harus datar dan dietsa (untuk logam).	Harus konduktif (atau dilapisi emas/karbon jika non-konduktif).	Harus super tipis (< 100 nm) agar dapat ditembus elektron.

10.3 Analisis Struktur Kristal

Sifat mekanis dan fisik material padat sangat dipengaruhi oleh pola keteraturan atom di dalam strukturnya. Berdasarkan tingkat keteraturan tersebut, material umumnya diklasifikasikan menjadi dua kelompok

utama, yaitu kristalin yang memiliki susunan atom teratur secara periodik, dan amorf yang tidak menunjukkan pola keteraturan jangka panjang.

Kajian terhadap struktur kristal bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai jenis fasa yang terbentuk, dimensi kisi kristal, serta orientasi atom di dalam material. Salah satu metode yang paling banyak digunakan dan telah menjadi standar dalam analisis struktur kristal adalah Difraksi Sinar-X (*X-Ray Diffraction/ XRD*). Teknik ini dikembangkan berdasarkan prinsip-prinsip dasar yang telah lama dibahas dalam literatur klasik, seperti karya B.D. Cullity dan William D. Callister.

10.3.1 Fenomena Interaksi Sinar-X dengan Kisi Kristal

Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik berenergi tinggi dengan panjang gelombang berkisar antara 0,05 hingga 0,25 nm, yang sebanding dengan jarak antar bidang atom dalam struktur kristal. Kesetaraan skala ini memungkinkan sinar-X berinteraksi secara efektif dengan kisi kristal.

Ketika berkas sinar-X diarahkan ke material kristalin, atom-atom yang tersusun periodik akan menyebabkan gelombang tersebut mengalami hamburan. Gelombang hasil hamburan dari berbagai bidang atom kemudian saling berinteraksi, menghasilkan pola interferensi. Interaksi tersebut menghasilkan dua kemungkinan:

- Interferensi Destruktif: ada interferensi destruktif, perbedaan fase antar gelombang menyebabkan saling pelemahan sehingga tidak terdeteksi oleh instrumen
- Interferensi Konstruktif (Difraksi): Gelombang berada dalam fase yang sama sehingga saling menguatkan. Fenomena inilah yang menghasilkan

puncak intensitas pada pola difraksi yang diamati dalam analisis XRD.

10.3.2 Hukum Bragg sebagai Fondasi Analisis

Prinsip utama yang menjelaskan terjadinya difraksi pada material kristalin dirumuskan dalam Hukum Bragg. Hukum ini menyatakan bahwa difraksi akan terjadi ketika selisih lintasan antara gelombang sinar-X yang dipantulkan oleh bidang-bidang atom yang sejajar memenuhi kondisi tertentu, yaitu bernilai kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang.

Secara matematis, hubungan tersebut dinyatakan dalam persamaan Hukum Bragg sebagai berikut:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \qquad (10.2)$$

Dimana :

n = adalah bilangan bulat yang menunjukkan o rde difraksi (n = 1, 2, 3, …).

λ = adalah panjang gelombang dari sumber radiasi sinar-X yang digunakan (misalnya, katoda Tembaga/Cu Kα = 0.15406 nm).

d_{hkl} = adalah jarak antar bidang kisi Kristal yang parallel dengan indeks Miller (hkl)

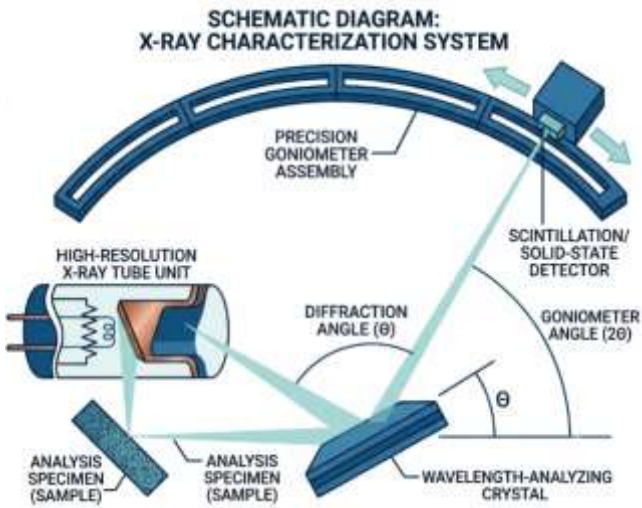
θ = adalah sudut datang sinar-X terhadap bidang kisi (sudut Bragg).

Berdasarkan hubungan tersebut, apabila panjang gelombang sinar-X yang digunakan telah diketahui dan sudut difraksi dapat diperoleh melalui pengukuran eksperimental, maka jarak antar bidang atom (d_{hkl}) dapat ditentukan secara kuantitatif. Informasi nilai (d_{hkl}) ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk

mengidentifikasi struktur kristal suatu material secara akurat.

Sebagai contoh, pada sistem kristal Kubik, hubungan antara jarak antar-bidang (d_{hkl}) dan parameter kisi atau panjang rusuk unit sel (α) mengikuti rumus:

$$d_{hkl}=\frac{\alpha}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \qquad (10.3)$$



Gambar 10. 4 Diagram Skematik Instrumen Diffraksi X-Ray

(Sumber : Cullity, B. D., & Stock, S. R., 2001)

10.3.3 Interpretasi Grafik Difraktogram XRD

Hasil pengujian XRD umumnya direpresentasikan dalam bentuk kurva dua dimensi yang dikenal sebagai difraktogram. Kurva ini menunjukkan hubungan antara intensitas sinar-X yang terdeteksi dengan posisi sudut

difraksi, yang dinyatakan sebagai 2θ. Nilai intensitas diplot pada sumbu vertikal, sedangkan sudut 2θ ditempatkan pada sumbu horizontal.

Ketika menganalisis sebuah difraktogram, terdapat tiga informasi utama yang wajib diekstrak:

1. Posisi Puncak (Nilai 2θ): Menunjukkan ukuran dan geometri dari unit sel kristal berdasarkan Hukum Bragg.
2. Intensitas Puncak (Tinggi/ Luas Area): Mencerminkan jenis atom yang mengisi kisi serta orientasi preferensial kristal (texture).
3. Profil Bentuk Puncak (Peak Broadening): Lebar puncak pada kondisi setengah maksimum (*Full Width at Half Maximum / FWHM*) digunakan untuk mengestimasi ukuran kristalit (*crystallite size*) dan regangan mikro internal kisi.

Untuk menghitung ukuran kristalit rata-rata (D), digunakan **Persamaan Scherrer**:

$$D = \frac{K\,\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad (10.4)$$

Dimana :

K = konstanta bentuk kristal (biasanya berkisar 0.9),

λ = merupakan panjang gelombang sinar-X,

β = nilai FWHM dalam satuan radian, dan

θ = sudut posisi puncak.

10.3.4 Perbandingan Karakteristik Profil Struktur Material

Bentuk pola difraksi antara material yang memiliki keteraturan atom (kristal) dengan material acak (amorf) memiliki perbedaan visual yang sangat kontras. Tabel

10.3 berikut merangkum perbedaan karakteristik difraksi kedua jenis material tersebut:

Tabel 10. 3 Perbedaan Karakteristik difraksi material

Parameter Pembeda	Material Kristalin (Contoh: Baja, Alumina)	Material Amorf (Contoh: Kaca Silika, Polimer)
Susunan Atom	Periodik, teratur, memiliki orientasi jangka panjang.	Acak, tidak teratur, hanya ada keteraturan jangka pendek.
Karakteristik Puncak XRD	Menghasilkan puncak-puncak yang tajam (*sharp peaks*) dan diskrit pada sudut 2θ tertentu.	Menghasilkan pola melebar yang landai menyerupai bukit (*halo pattern* atau *hump*).
Interferensi Gelombang	Bersifat konstruktif sempurna pada sudut-sudut spesifik yang memenuhi Hukum Bragg.	Bersifat destruktif di hampir semua sudut karena jarak antar-atom bervariasi.
Aplikasi Analisis	Penentuan jenis fasa, parameter kisi, derajat kristalinitas, dan tegangan sisa.	Penentuan derajat amorfisasi atau persentase fasa cair yang membeku cepat.

Dengan menganalisis posisi puncak difraksi dan melakukan pencocokan pola (*fingerprint matching*) terhadap database standar seperti International Centre for Diffraction Data (ICDD), seorang insinyur dapat mengidentifikasi fasa kristal yang terbentuk. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang akurat terhadap

keberhasilan suatu proses rekayasa material dalam menghasilkan struktur yang diinginkan.

10.4 Analisis Komposisi Material

Pemahaman terhadap struktur kristal saja belum cukup untuk menilai kinerja material teknik secara komprehensif. Sifat-sifat seperti ketahanan korosi, konduktivitas, maupun kekuatan mekanis sangat dipengaruhi oleh komposisi unsur penyusunnya.

Analisis komposisi kimia bertujuan untuk mengidentifikasi jenis unsur yang terkandung dalam material serta menentukan jumlah relatif masing-masing unsur tersebut. Pendekatan ini mencakup analisis kualitatif dan kuantitatif. Dalam praktiknya, teknik analisis modern didasarkan pada interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan elektron pada atom atau ikatan kimia dalam material, sebagaimana dijelaskan dalam literatur klasik seperti karya Skoog, Holler, dan Crouch serta referensi material teknik oleh Callister.

10.4.1 *Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS/EDX)

Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (*EDS* atau *EDX*) merupakan teknik analisis komposisi pada skala mikro yang umumnya terintegrasi dengan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* maupun *Transmission Electron Microscopy (TEM).* Metode ini didasarkan pada deteksi sinar-X karakteristik yang dipancarkan oleh material setelah berinteraksi dengan berkas elektron berenergi tinggi.

Fenomena yang terjadi di dalam atom dapat dijelaskan melalui beberapa tahapan. Pertama, elektron berenergi tinggi dari berkas primer mampu mengeluarkan elektron dari kulit atom bagian dalam,

sehingga menciptakan kekosongan pada tingkat energi tersebut. Selanjutnya, untuk mencapai kondisi yang lebih stabil, elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi akan berpindah mengisi posisi yang kosong tersebut. Proses perpindahan ini menghasilkan pelepasan energi dalam bentuk foton sinar-X yang memiliki energi spesifik sesuai dengan jenis unsur penyusunnya.

Energi sinar-X yang dipancarkan dari suatu material memiliki nilai yang khas untuk setiap unsur, karena perbedaan tingkat energi antar kulit atom bersifat unik. Hal ini menyebabkan setiap unsur menghasilkan spektrum energi yang spesifik, sehingga dapat digunakan sebagai identitas dalam analisis komposisi. Besar energi foton yang diemisikan mengikuti hubungan dasar dalam fisika kuantum sebagaimana dinyatakan dalam hukum Planck, yang menghubungkan energi dengan frekuensi radiasi.

$$\Delta E = E_{luar} - E_{dalam} = hv = \frac{hc}{\lambda} \qquad (10.5)$$

Dimana :

ΔE = adalah energi sinar-X karakteristik

h = adalah konstanta Planck

c = adalah kecepatan cahaya

λ = adalah panjang gelombang

Detektor EDS merekam jumlah foton yang diterima pada setiap tingkat energi dan menampilkannya dalam bentuk spektrum, yaitu grafik yang menunjukkan hubungan antara intensitas sinyal dan energi foton (dalam satuan keV). Selain itu, teknik ini juga memungkinkan analisis distribusi unsur melalui fitur elemental mapping, yang memvisualisasikan sebaran masing-masing unsur dalam bentuk warna kontras pada citra struktur mikro hasil pengamatan SEM.

10.4.2 X-*ray Fluorescence* (XRF)

Jika metode EDS digunakan untuk analisis komposisi pada skala mikro dengan fokus pada area lokal, maka *X-ray Fluorescence (XRF)* lebih umum diterapkan untuk analisis komposisi secara keseluruhan (bulk material). Meskipun kedua teknik ini sama-sama berbasis pada emisi sinar-X karakteristik, mekanisme eksitasi yang digunakan berbeda.

Pada XRF, proses eksitasi tidak dilakukan oleh berkas elektron seperti pada EDS, melainkan menggunakan sinar-X berenergi tinggi yang dihasilkan dari tabung sinar-X (X-ray tube). Interaksi ini kemudian memicu emisi sinar-X dari unsur-unsur dalam material yang dapat digunakan untuk identifikasi komposisi.

Keunggulan Metodologi XRF :

- Salah satu keunggulan metode ini adalah kemampuannya dalam melakukan pengujian tanpa merusak sampel (*Non-Destructive Testing*). Material, baik dalam bentuk padat seperti logam dan keramik maupun dalam bentuk serbuk seperti semen dan mineral, dapat dianalisis secara langsung tanpa memerlukan proses pelarutan kimia yang berpotensi mencemari lingkungan.
- Memiliki rentang deteksi unsur yang sangat luas, mulai dari unsur ringan seperti Berilium (Be) hingga unsur berat seperti Uranium (U). Teknik ini juga mampu memberikan hasil analisis dengan tingkat akurasi tinggi, baik pada konsentrasi besar (persen) maupun pada tingkat jejak yang sangat kecil hingga satuan part per million (ppm).
- Teknik ini banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri, seperti industri semen, metalurgi baja, dan geologi, terutama untuk melakukan

pengendalian kualitas komposisi bahan baku secara cepat dan efisien.

10.4.3 *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Untuk material non-logam seperti polimer, plastik, biomaterial, dan komposit, penggunaan teknik berbasis sinar-X seperti EDS dan XRF menjadi kurang optimal karena komposisinya didominasi oleh unsur-unsur ringan seperti karbon, hidrogen, oksigen, dan nitrogen. Oleh karena itu, pendekatan karakterisasi yang berbeda diperlukan untuk mengidentifikasi struktur kimianya.

Salah satu teknik yang paling sesuai untuk kelompok material ini adalah *Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*. Berbeda dengan metode EDS dan XRF yang berfokus pada eksitasi elektron di tingkat atom, FTIR bekerja dengan cara memanfaatkan radiasi inframerah untuk merangsang getaran ikatan molekul, sehingga memungkinkan identifikasi gugus fungsi dalam material.

Prinsip Vibrasi Molekul dan Gugus Fungsi :

Ketika material menyerap radiasi inframerah, ikatan antar atom di dalam molekul akan mengalami gerakan vibrasi, baik dalam bentuk regangan (*stretching*) maupun perubahan sudut ikatan (*bending*). Vibrasi ini hanya dapat berinteraksi dengan radiasi inframerah apabila menghasilkan perubahan distribusi muatan dalam molekul, yang secara fisika dinyatakan sebagai perubahan momen dipol.

Setiap jenis ikatan kimia, seperti C–H, O–H, C=O, maupun C=N, memiliki karakteristik penyerapan radiasi inframerah pada bilangan gelombang tertentu. Nilai bilangan gelombang ini biasanya dinyatakan dalam

satuan cm^{-1} dan menjadi dasar dalam mengidentifikasi jenis gugus fungsi yang terdapat dalam suatu material.

Wilayah sidik jari (*fingerprint region*) merupakan bagian penting dalam spektrum FTIR. Data hasil pengukuran disajikan dalam bentuk kurva yang memplot nilai transmitansi (%) terhadap bilangan gelombang (cm^{-1}). Pola serapan yang terbentuk pada daerah ini bersifat sangat khas untuk setiap senyawa, sehingga dapat digunakan sebagai "sidik jari" untuk mengidentifikasi senyawa organik maupun jenis polimer dengan tingkat keakuratan tinggi.

10.4.4 Matriks Perbandingan Instrumen Analisis Komposisi Kimia

Tabel 10.4 berikut merangkum perbedaan esensial dari ketiga metodologi karakterisasi kimia guna mempermudah dalam menentukan instrumen yang tepat sesuai jenis sampel:

Tabel 10. 4 Perbandingan Instrumen Analisis Komposisi Kimia

Parameter Evaluasi	***Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS)**	***X-ray Fluorescence* (XRF)**	***Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)**
Sumber Eksitasi	Berkas Elektron Kontinu (dari SEM / TEM)	Sinar-X Primer (*X-Ray Tube*)	Radiasi Gelombang Inframerah
Target Interaksi	Elektron kulit dalam atom	Elektron kulit dalam atom	Ikatan kovalen molekul (Momen Dipol)

Parameter Evaluasi	***Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS)**	***X-ray Fluorescence* (XRF)**	***Fourier-Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)**
Informasi Utama	Komposisi unsur lokal pada area mikro dan peta sebaran (*mapping*).	Komposisi unsur total (*bulk*) secara kuantitatif dan kualitatif.	Identifikasi gugus fungsi dan jenis senyawa organic /polimer.
Skala Area Analisis	Mikro hingga Nano (μm hingga nm)	Makro (Milimeter hingga Sentimeter)	Makro hingga Mikro (dengan mikro-FTIR)
Jenis Material Utama	Logam, keramik, mineral, lapisan tipis (*thin film*).	Semen, batuan, logam paduan, limbah industri.	Plastik, polimer, karet, komposit organik, farmasi.
Preparasi Sampel	Harus konduktif dan tahan terhadap kondisi hampa udara.	Sampel dihaluskan menjadi bubuk padat (*pellet*) atau logam rata.	Sampel dapat berbentuk padat, cair, atau dicampur bubuk KBr.

10.5 Analisis Termal

Analisis termal merupakan sekumpulan metode karakterisasi yang digunakan untuk mengamati perubahan sifat fisik maupun kimia material akibat variasi temperatur yang dikendalikan. Melalui pendekatan ini, respons material terhadap pemanasan atau pendinginan dapat dipelajari secara sistematis.

Dalam berbagai literatur, seperti *Thermal Analysis of Polymers* oleh Joseph D. Menczel serta Materials Science and Engineering oleh William D. Callister, dijelaskan bahwa teknik ini memiliki peran penting dalam mengevaluasi stabilitas termal, mengidentifikasi terjadinya transisi fasa, serta menganalisis proses degradasi material pada kondisi temperatur tinggi.

10.5.1 *Thermogravimetric Analysis* (TGA)

Thermogravimetric Analysis (TGA) merupakan teknik analisis kuantitatif yang digunakan untuk merekam perubahan massa suatu sampel secara kontinu selama mengalami proses pemanasan atau pendinginan. Pengujian ini dilakukan dalam kondisi atmosfer yang dikendalikan, seperti gas inert (nitrogen) maupun gas reaktif (oksigen atau udara), sehingga memungkinkan pengamatan perilaku material dalam berbagai lingkungan.

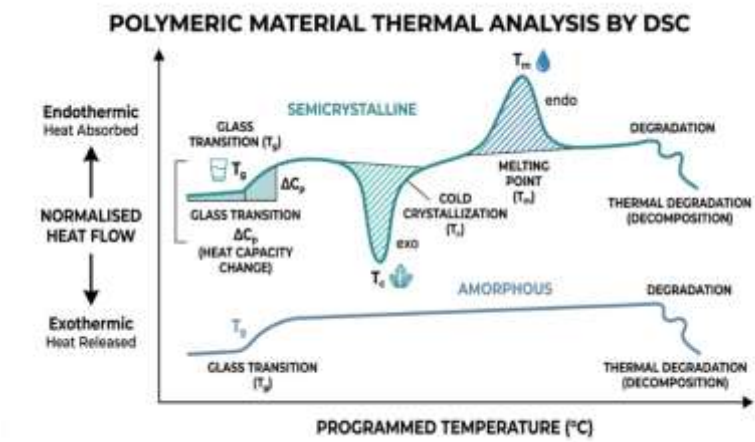
Instrumen TGA dilengkapi dengan timbangan mikro berpresisi tinggi yang mampu mendeteksi perubahan massa dalam skala yang sangat kecil. Data yang diperoleh umumnya ditampilkan dalam bentuk kurva TGA, yang menunjukkan hubungan antara massa sampel dan temperatur, serta kurva DTG, yaitu turunan pertama dari kurva tersebut yang menggambarkan laju perubahan massa terhadap temperatur.

- Kehilangan Massa: Biasanya terjadi karena penguapan kelembaban, dekomposisi kimia, atau desorpsi gas.
- Kenaikan Massa: Sering terjadi pada proses oksidasi logam atau pembakaran material dalam atmosfer oksigen.

Kurva DTG memberikan kemudahan dalam interpretasi karena mampu menunjukkan titik temperatur di mana laju dekomposisi material mencapai nilai maksimum. Titik ini ditandai oleh puncak pada kurva DTG, yang merepresentasikan kondisi ketika penurunan massa berlangsung paling cepat.

10.5.2 *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Berbeda dengan TGA yang berfokus pada perubahan massa, *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) digunakan untuk mengamati aliran panas yang diserap maupun dilepaskan oleh suatu material selama proses pemanasan. Metode ini bekerja dengan membandingkan respons termal antara sampel dan bahan referensi, yang keduanya dipanaskan pada kecepatan kenaikan temperatur yang sama.



Gambar 10. 5 Kurva *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*

(Sumber : Azhari, Rahmi Karolina, Sally Irvina Ritonga, 2022)

Kurva DSC memberikan informasi mendalam mengenai peristiwa termal berikut:

1. Suhu Transisi Gelas (Tg): Ditunjukkan oleh perubahan garis dasar (*baseline shift*) pada kurva DSC, yang merefleksikan peralihan material, khususnya polimer, dari kondisi kaku menyerupai kaca menjadi lebih elastis seperti karet.
2. Suhu Kristalisasi (Tc): Ditandai oleh munculnya puncak eksotermik pada kurva, yang mengindikasikan pelepasan energi akibat terbentuknya struktur kristal dari fase yang sebelumnya tidak teratur atau cair.
3. Suhu Leleh (Tm): Ditunjukkan oleh puncak endotermik, yang merepresentasikan penyerapan energi ketika material mengalami perubahan fase dari padat menjadi cair.

Persamaan dasar yang digunakan untuk menghitung kapasitas panas spesifik (C_p) dalam DSC adalah:

$$Q = m \,.\, C_p \,.\, \Delta T \qquad (10.6)$$

Dimana :

Q = adalah total panas yang diserap / dilepaskan

M = adalah massa sampel

ΔT = adalah perubahan temperature

10.5.3 Perbandingan Metodologi Analisis Termal

Untuk mempermudah pemilihan instrumen bagi penelitian atau kontrol kualitas di industri, berikut adalah Tabel 10.5 perbandingan antara *TGA* dan *DSC*:

Tabel 10. 5 Perbandingan antara *TGA* dan *DSC*

Parameter Evaluasi	*Thermogravimetric Analysis (TGA)*	*Differential Scanning Calorimetry (DSC)*
Sifat yang Diukur	Perubahan massa sampel terhadap suhu.	Perubahan aliran panas (*heat flow*) terhadap suhu.
Informasi Utama	Stabilitas termal, kadar air, kandungan volatil, residu abu	Suhu transisi gelas (T_g), titik leleh (T_m), entalpi reaksi.
Pemicu Perubahan	Degradasi, oksidasi, penguapan	Perubahan fase, reaksi kimia, relaksasi molekul.
Output Utama	Kurva massa vs suhu (Termogram).	Kurva aliran panas vs suhu (Endoterm/Eksoterm).
Aplikasi Utama	Penentuan masa pakai polimer, kadar karbon hitam dalam karet.	Identifikasi jenis polimer, derajat kristalinitas, kemurnian zat.

Penggunaan analisis termal secara terpadu, yang dikenal sebagai *Simultaneous Thermal Analysis (STA)*, memungkinkan pemahaman yang lebih menyeluruh terhadap perilaku material. Dengan mengombinasikan informasi dari TGA dan DSC, berbagai aspek perubahan material dapat dianalisis secara simultan.

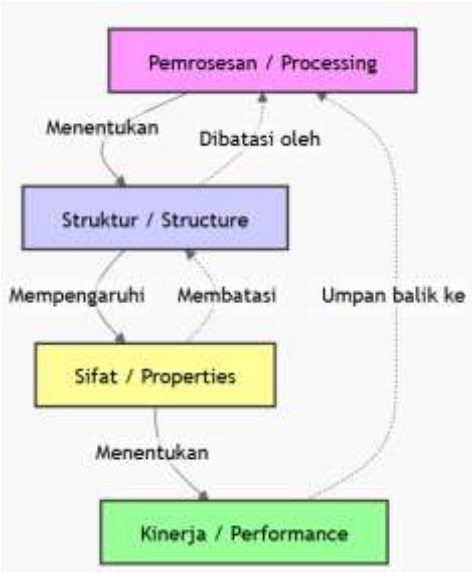
Sebagai ilustrasi, dalam proses failure analysis pada komponen polimer yang mengalami deformasi akibat panas, TGA dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya degradasi kimia melalui perubahan massa, sedangkan DSC berperan dalam menentukan apakah kondisi operasi telah melampaui suhu transisi, seperti suhu transisi gelas. Integrasi kedua data ini memberikan

dasar yang kuat untuk mengevaluasi performa material serta menentukan batas aman penggunaannya dalam aplikasi yang melibatkan temperatur tinggi.

BAB 11
APLIKASI MATERIAL TEKNIK

Ilmu material teknik tidak hanya mencakup pemahaman tentang struktur atom, ikatan antaratom, serta sifat mekanis dan fisik material. Aspek yang lebih aplikatif adalah bagaimana material tersebut dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan nyata di berbagai sektor. Aplikasinya meliputi konstruksi gedung bertingkat, kendaraan bermotor, perangkat medis, hingga komponen pesawat luar angkasa, yang semuanya bergantung pada pemilihan material yang tepat (Callister & Rethwisch, 2018).

Gambar 11.1 menunjukkan peta konsep yang menghubungkan struktur internal material dengan sifat-sifatnya, serta peran proses manufaktur dalam mengubah sifat tersebut menjadi kinerja akhir pada suatu aplikasi. Pemahaman hubungan struktur–sifat–pemrosesan–kinerja menjadi dasar penting bagi insinyur dalam merancang produk yang aman, efisien, dan ekonomis.



Gambar 11. 1 Peta Konsep Hubungan Struktur, Sifat, Pemrosesan, Dan Kinerja Material

(Sumber : AI-generated image)

Bab ini membahas secara komprehensif aplikasi material teknik yang diklasifikasikan ke dalam empat kelompok utama, yaitu logam, keramik, polimer, dan komposit. Selain itu, dibahas pula material canggih seperti *nanomaterial*, *smart materials*, dan material berkelanjutan, serta disertai studi kasus di Indonesia.

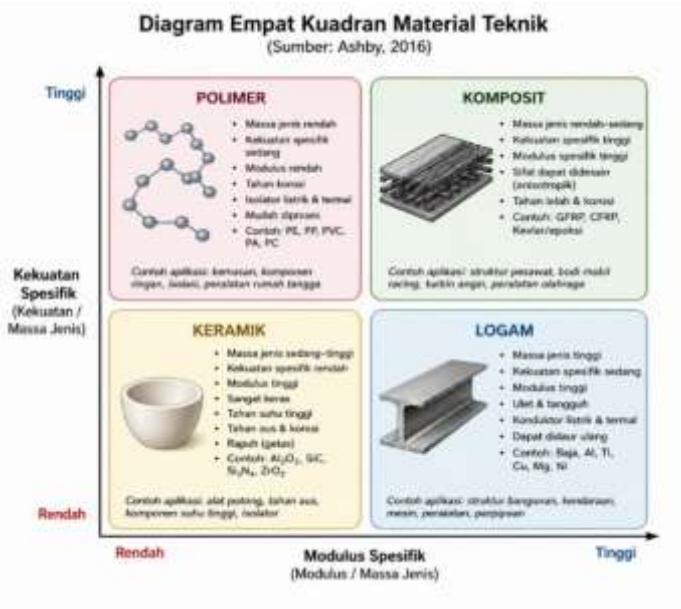
Tujuan pembelajaran pada bab ini adalah:

1. Mengklasifikasikan material teknik ke dalam empat kelompok utama beserta karakteristik dasarnya.
2. Menjelaskan aplikasi spesifik tiap kelompok material dalam berbagai bidang industri.

3. Menganalisis perkembangan material canggih serta mempertimbangkan aspek keberlanjutan dalam pemilihan material.
4. Mengidentifikasi penerapan material teknik studi kasus di Indonesia.

11.1 Klasifikasi dan Karakteristik Material Teknik

Secara umum, material teknik diklasifikasikan ke dalam empat kelompok utama, yaitu logam, keramik, polimer, dan komposit. Setiap kelompok memiliki karakteristik khas yang membedakannya satu sama lain, sebagaimana ditunjukkanpada Gambar 11.2 dan Tabel 11.1.



Gambar 11. 2 Diagram Empat Kuadran Material Teknik (Logam, Keramik, Polimer, Komposit)

(Sumber: Ashby, 2016)

Tabel 11. 1 Perbandingan Sifat Mekanik dan Fisik Keempat Kelas Material

Kelas Material	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	Densitas (g/cm^3)	Konduktivitas Termal (W/m·K)
Logam (baja)	400–2000	190–210	7,8	40–50
Keramik (Al_2O_3)	200–500	300–400	3,9	20–30
Polimer (PE)	20–40	0,2–1,0	0,9–1,4	0,3–0,5
Komposit (CFRP)	600–1500	70–150	1,5–1,6	5–10 (catatan bahwa ini untuk arah sejajar serat; nilai berbeda untuk arah transversal)

Sumber: Ashby (2016); Smallman & Bishop (2019)

11.2.1 Logam

Logam merupakan material anorganik dengan ikatan logam yang menghasilkan keberadaan elektron bebas. Karakteristik utamanya meliputi konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, sifat ulet (mampu ditarik menjadi kawat), serta kekuatan yang baik. Contoh logam antara lain besi, baja, aluminium, tembaga, dan titanium. Secara umum, logam diklasifikasikan menjadi logam fero (mengandung besi) dan non-fero (Smallman & Bishop, 2019).

11.2.2 Keramik

Keramik merupakan material yang tersusun oleh ikatan ionik dan/atau kovalen, sehingga memiliki kekerasan tinggi namun bersifat getas (*brittle*). Material ini tahan terhadap suhu tinggi dan korosi, serta umumnya bersifat isolator listrik. Contohnya meliputi alumina, zirkonia, silikon karbida, dan kaca (Carter & Norton, 2013).

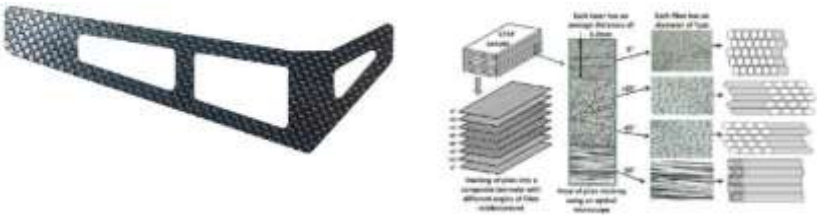
11.2.3 Polimer

Polimer adalah rantai panjang molekul organik (makromolekul). Sifatnya ringan, mudah dibentuk, isolator listrik, dan tahan korosi. Berdasarkan perilaku termalnya, polimer dibagi menjadi termoplastik (dapat dilunakkan berulang) dan termoseting (mengeras permanen) (Utracki, 2018).

11.2.4 Komposit

Komposit merupakan material rekayasa yang terdiri dari dua atau lebih komponen penyusun, yaitu matriks dan penguat, yang dikombinasikan untuk memperoleh sifat yang lebih unggul. Contoh yang umum digunakan adalah serat karbon dalam matriks epoksi atau *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (*CFRP*), serta serat kaca dalam matriks poliester atau *Glass Fiber Reinforced Polymer* (*GFRP*).

GFRP merupakan komposit ringan dan kuat yang tersusun dari serat kaca yang tertanam dalam matriks polimer (resin), sering dikenal sebagai *fiberglass*. Material ini memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi dan bahan kimia, sehingga banyak digunakan sebagai alternatif baja dalam konstruksi, otomotif, dan industri perkapalan karena sifatnya yang kuat dan tahan karat (Matthews & Rawlings, 2014).



(a)



(b)

Gambar 11. 3 (a) GFRP dan (b) CFRP

(Sumber Henan Zhongsheng Composite Materials Co., Ltd.)

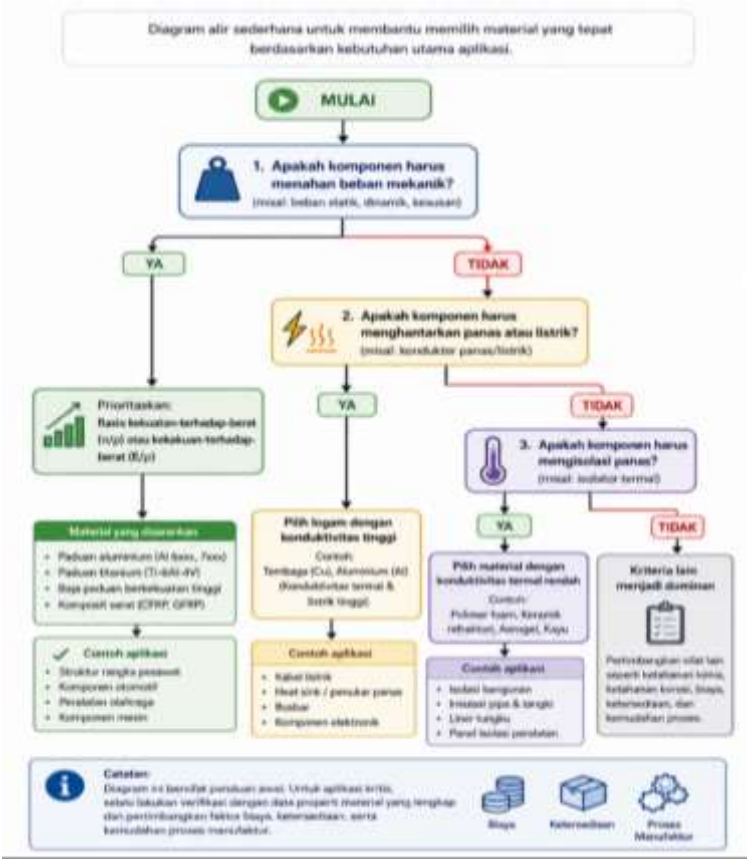
11.2.5 Panduan Pemilihan Material Berdasarkan Aplikasi

Berikut disajikan diagram panduan pemilihan material berdasarkan kebutuhan aplikasi. Diagram pada Gambar 13.4 berbentuk alur sederhana yang disusun dari sejumlah pertanyaan kunci, yaitu:

1. Apakah komponen harus menahan beban mekanik?
Prioritaskan material dengan rasio kekuatan-terhqadap-berat (σ/ρ) atau kekakuan-terhadap-berat (E/ρ) yang tinggi.
2. Apakah komponen harus menghantarkan panas atau listrik?
Pilih logam dengan konduktivitas tinggi seperti tembaga atau aluminium.
3. Apakah komponen harus berfungsi sebagai isolator panas?

Gunakan material dengan konduktivitas termal rendah, seperti *polymer foam* atau keramik refraktori.

Diagram ini membantu insiyur dalam menentukan jenis material yang paling sesuai berdasarkan tuntutan fungsi dan kondisi operasi.



Gambar 11. 4 Diagram Panduan Pemilihan Bahan Berdasarkan Aplikasi

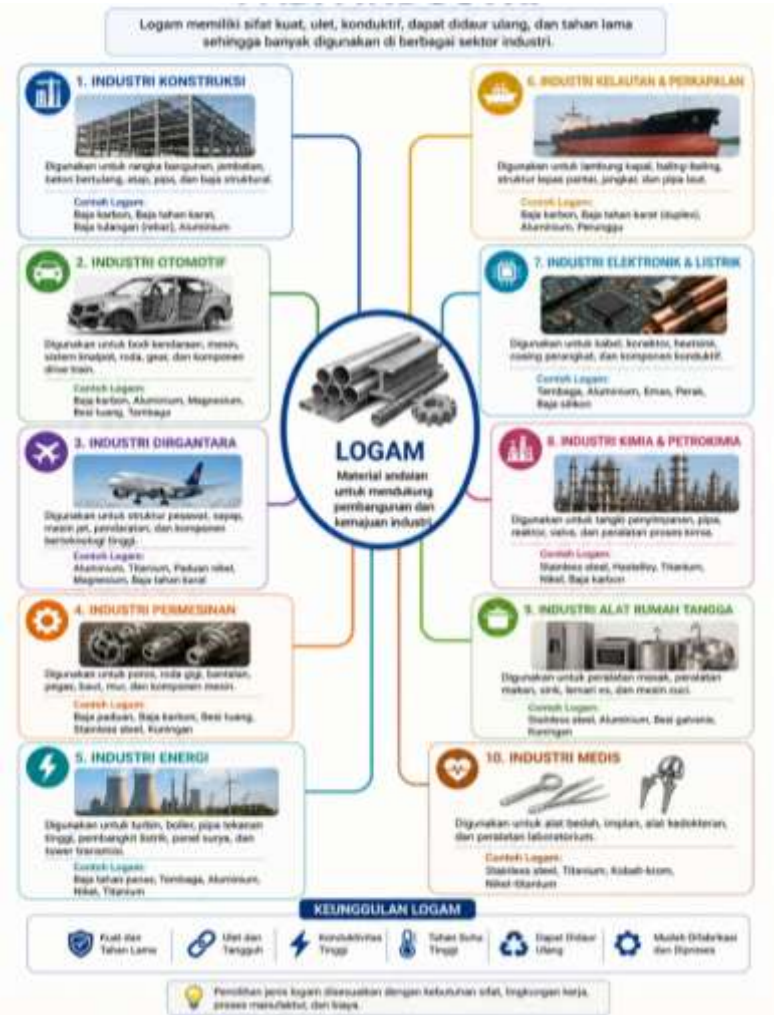
(Sumber : AI-generated image)

Catatan: Diagram ini hanya berfungsi sebagai panduan awal. Untuk aplikasi yang bersifat kritis, diperlukan verifikasi menggunakan data sifat material yang lengkap, serta mempertimbangkan aspek biaya, ketersediaan, dan kemudahan proses manufaktur.

11.3 Aplikasi Material Konvensional

11.3.1 Aplikasi Logam

Logam dan paduannya merupakan material utama dalam berbagai sektor industri, seperti industri berat, konstruksi, otomotif, dirgantara, dan medis. Gambar 11.5 menampilkan contoh aplikasi logam, sedangkan Tabel 11.2 merangkum jenis paduan utama beserta penggunaannya.



Gambar 11. 5 Aplikassi logam Pada Industri

(Sumber : AI-generated image)

Tabel 11. 2 Aplikasi Paduan Logam Utama Di Industry

Paduan Logam	Bidang Aplikasi	Contoh Komponen
Baja karbon rendah	Konstruksi	Balok, tulangan beton
Baja tahan karat 316L	Medis	Implan ortopedi, instrumen bedah
Paduan aluminium 7075	Dirgantara	Struktur sayap pesawat
Paduan magnesium	Otomotif	Rumah transmisi, roda

Sumber: Lestari (2021); Budi & Santoso (2019)

Error! Reference source not found. menunjukkan paduan logam dan aplikasinya



Gambar 11. 6 Padual Logam dan Aplikasinya

(Sumber : AI-generated image)

Industri Konstruksi

Baja struktural seperti S355 dan S460 banyak digunakan pada gedung bertingkat, jembatan, dan menara. Penggunaan beton bertulang (*reinforced concrete*) mengombinasikan kekuatan tekan beton dengan kekuatan tarik baja, sehingga menghasilkan struktur yang lebih optimal (Callister & Rethwisch, 2018).



Gambar 11. 7 Baja untuk Konstruksi Bangunan Gedung

(Sumber : AI-generated image)

Industri Otomotif

Baja berkekuatan tinggi (*High Strength Steel*/*HSS*) dan aluminium digunakan pada rangka bodi untuk menurunkan bobot sekaligus meningkatkan efisiensi bahan bakar. Selain itu, magnesium dan titanium mulai

diaplikasikan, terutama pada kendaraan mewah dan kendaraan listrik, karena keunggulan rasio kekuatan terhadap beratnya (Dini *et al*., 2024).



Gambar 11. 8 Aplikasi Material Campuran untuk Industri Otomotif

(Sumber : AI-generated image)

Industri Dirgantara

Paduan aluminium (seri 2xxx dan 7xxx) serta paduan titanium seperti Ti-6Al-4V banyak digunakan pada pesawat karena memiliki rasio kekuatan-terhadap-berat yang tinggi. Komponen seperti sayap, *landing gear*, dan *casing* mesin juga menuntut ketahanan lelah yang sangat baik untuk menjamin keandalan struktur (Smallman & Bishop, 2019).



Gambar 11. 9 Material Paduan dalam Industri Penerbangan

(Sumber : AI-generated image)

Industri Medis

Stainless steel 316L, paduan kobalt-kromium (*Co–Cr*), serta titanium *grade* 5 banyak digunakan pada implan medis seperti sendi buatan, pelat tulang, dan *stent*. Material tersebut harus memenuhi persyaratan

biokompatibilitas, memiliki ketahanan korosi yang tinggi, serta tidak memicu reaksi alergi dalam tubuh (Lestari, 2021).



Gambar 11. 10 Stainless Stell Sebagai Material Industri Medis

(Sumber : AI-generated image)

11.3.2 Aplikasi Keramik

Keramik konvensional seperti bata, genteng, dan ubin telah digunakan sejak lama. Namun, keramik teknik modern (*advanced ceramics*) dikembangkan untuk aplikasi yang lebih spesifik dan berperforma tinggi. Gambar 11.6 menampilkan beberapa contohnya.



(a) (b) (c)

Gambar 11. 11 (a) Ubin Keramik Lantai, (b) Isolator Listrik Tegangan Tinggi, (c) Implan Panggul Buatan Dari Zirkonia.

(Sumber: KIA Ceramic, Tianing Medical)

Tabel 11. 3 Jenis Keramik dan Aplikasinya

Jenis Keramik	Contoh Material	Aplikasi
Keramik konvensional	Tanah liat, silika	Bata, genteng, porselen
Keramik refraktori	Alumina, magnesia	Lapisan tungku, kiln
Keramik teknik	SiC, Si_3N_4	Alat potong, bantalan bola
Biokeramik	Hidroksiapatit, zirkonia	Implan gigi, sendi buatan

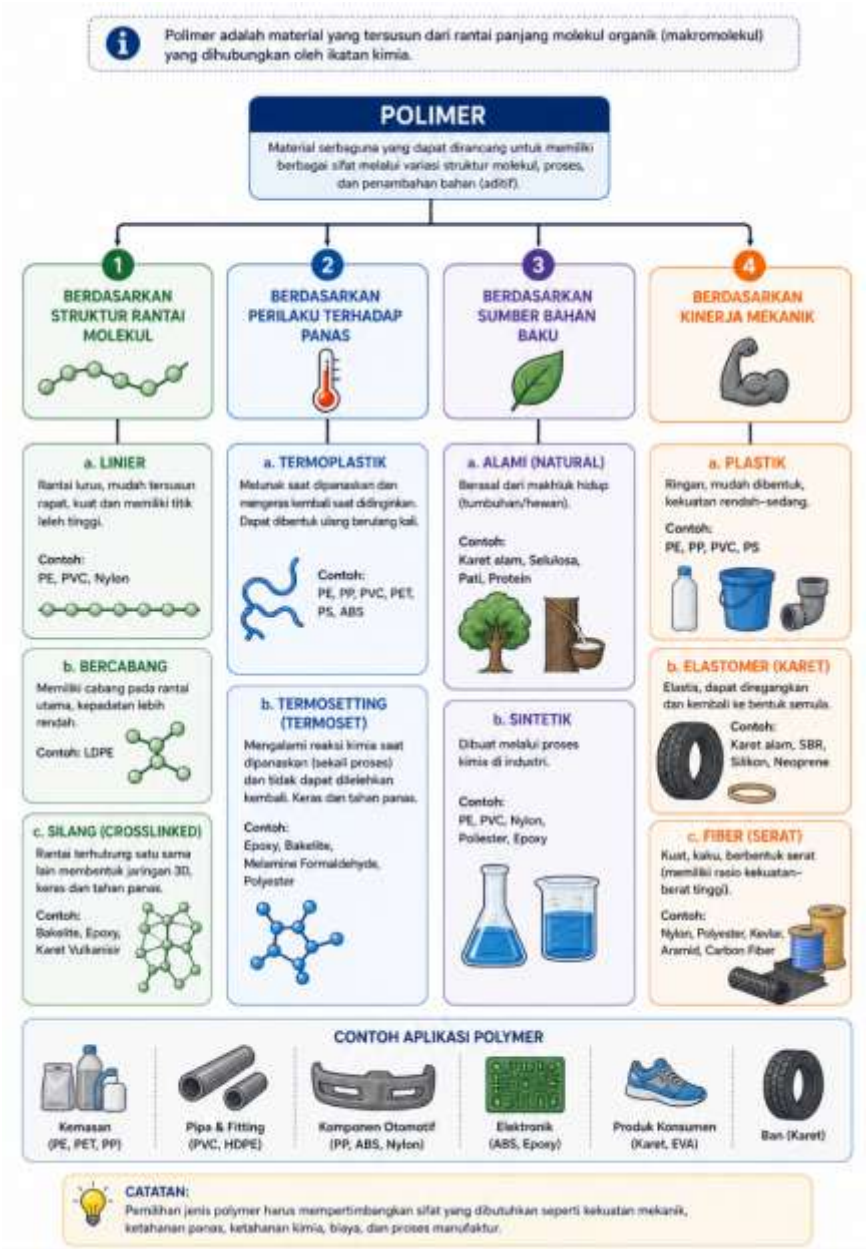
Sumber: Carter & Norton (2013); Setiawan (2023)

Keramik seperti silikon karbida (SiC) dimanfaatkan sebagai pelindung balistik karena memiliki kekerasan yang sangat tinggi. Di sisi lain, zirkonia (ZrO_2) menunjukkan ketangguhan yang relatif lebih baik dibandingkan keramik lainnya, sehingga sesuai untuk aplikasi medis seperti sendi buatan (Purnomo, 2022).

11.3.3 Aplikasi Polimer

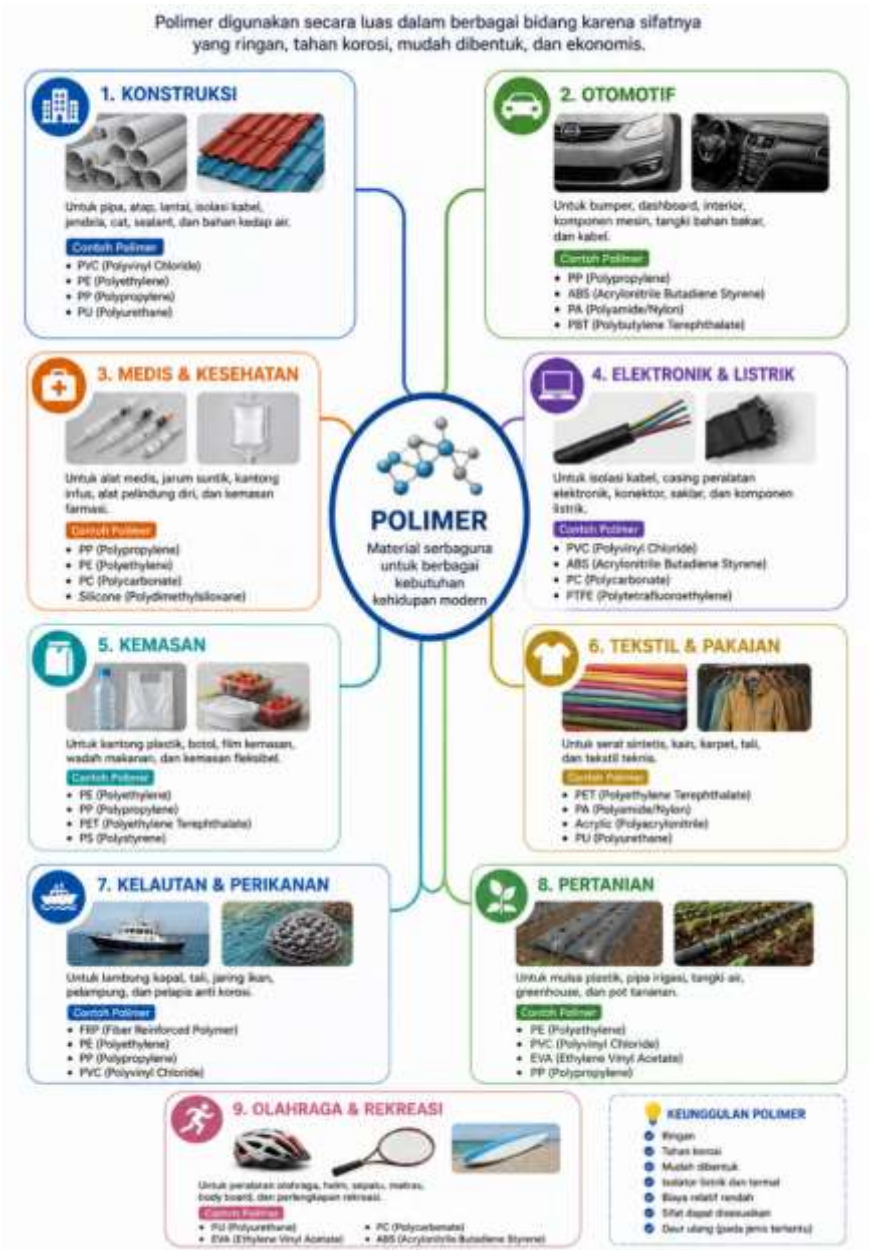
Material polimer merupakan material yang tersusun dari rantai panjang unit berulang (*monomer*) yang terikat secara kimia membentuk struktur makromolekul. Polimer umumnya memiliki densitas rendah, mudah dibentuk, tahan terhadap korosi, serta memiliki sifat isolasi listrik dan termal yang baik

Karena sifatnya yang fleksibel, ekonomis, dan mudah diproses, polimer banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari maupun industri, dalam bentuk plastik, karet, dan serat sintetis. Contoh polimer yang umum digunakan antara lain *Polyethylene* (PE), *Polypropylene* (PP), dan *Polyvinyl Chloride* (PVC). Jenis-jenis polimer ditunjukkan pada Gambar 11.7, sedangkan aplikasinya disajikan pada Gambar 11.8.



Gambar 11. 12 Diagram Jenis Polimer

(Sumber : AI-generated image)



Gambar 11. 13 Diagram aplikasi polimer

(Sumber : AI-generated image)

Polimer (*plastik*) telah banyak menggantikan logam dan keramik pada berbagai aplikasi karena memiliki keunggulan berupa ringan, biaya rendah, dan kemudahan dalam proses manufaktur. Gambar 11.5 menampilkan contoh produk polimer yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 11. 14 (a) Kemasan Makanan dari PET, (b) Bemper Mobil Polipropilen, (c) Sarung Tangan Medis dari Lateks, (d) Casing Ponsel Polikarbonat.

((Sumber: Indopet (kemasan PET); Toyota (bemper); Sunton Medical (sarung tangan); JETE (casing ponsel))

Bemper mobil umumnya dibuat dari *Polypropylene* (PP) atau *Polycarbonate* (PC) karena memiliki rasio kekuatan-terhadap-berat yang tinggi ($\sigma/\rho \approx 40–50$ kN·m/kg), ketangguhan impak yang baik (>50 kJ/m^2), serta mudah diproses melalui *injection molding*. Penggunaan polimer ini dapat menurunkan massa bemper hingga sekitar 50% dibandingkan baja, sehingga berkontribusi pada peningkatan efisiensi bahan bakar kendaraan

Tabel 11. 4 Perbandingan Termoplastik dan Termoseting

Jenis Polimer	Karakteristik	Contoh	Aplikasi
Termoplastik	Dapat dilunakkan berulang	PE, PP, PVC, PET	Botol, pipa, kemasan
Termoset	Mengeras permanen	Epoksi, bakelit, poliuretan	Perekat, komponen listrik

Sumber: Utracki (2018); Hasanah (2024)

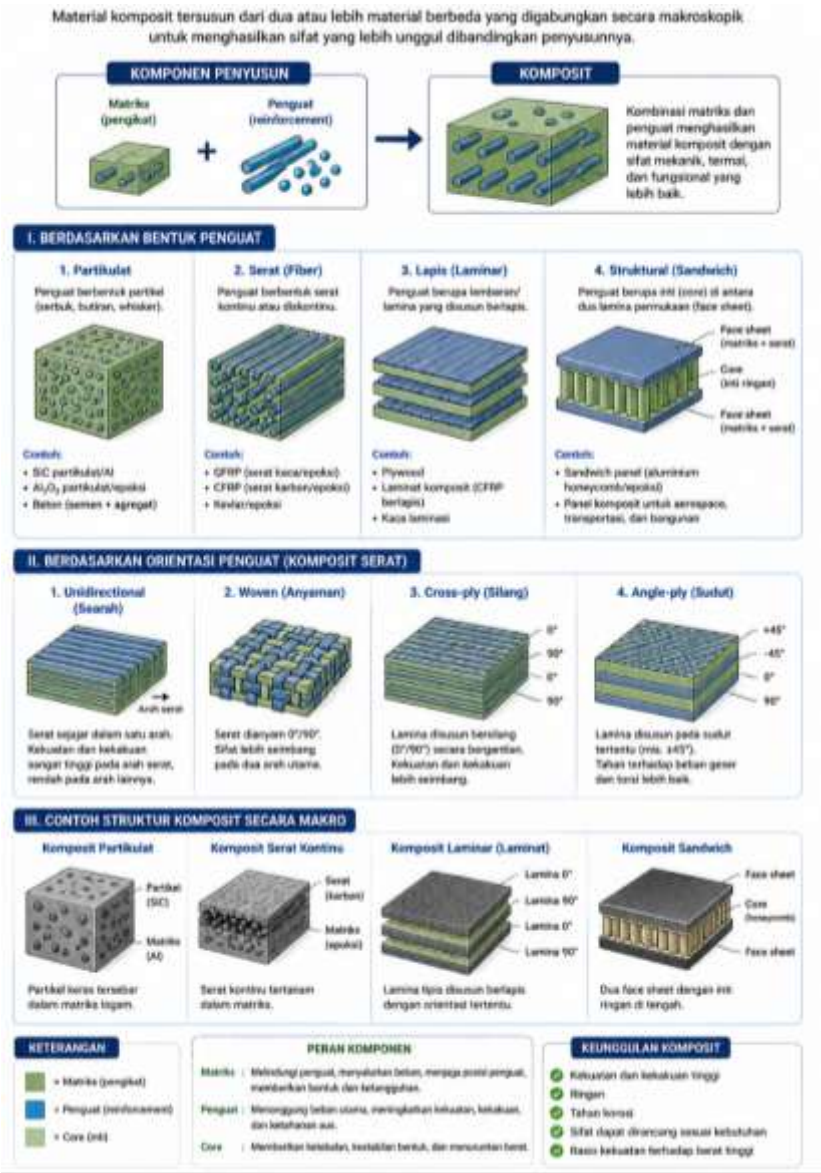
Polimer biokompatibel seperti *High Density Polyethylene* (HDPE) dan *Polypropylene* (PP) banyak digunakan pada wadah obat dan alat suntik. Selain itu, polimer konduktif seperti *polyaniline* dan *PEDOT* mulai dikembangkan untuk aplikasi perangkat elektronik fleksibel (Putri, 2022).

11.3.4 Aplikasi Komposit

Material komposit merupakan material yang tersusun dari dua atau lebih bahan berbeda yang dikombinasikan untuk memperoleh sifat yang lebih unggul dibandingkan masing-masing penyusunnya.

Secara umum, komposit terdiri atas matriks sebagai pengikat dan penguat sebagai elemen pemberi kekuatan.

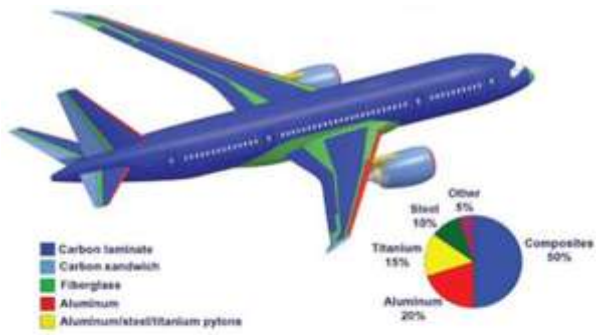
Kombinasi ini menghasilkan material yang ringan, kuat, tahan korosi, serta memiliki kinerja tinggi, sehingga banyak dimanfaatkan dalam bidang konstruksi, otomotif, dirgantara, dan industri teknik. Struktur material komposit ditunjukkan pada Gambar 11.10.



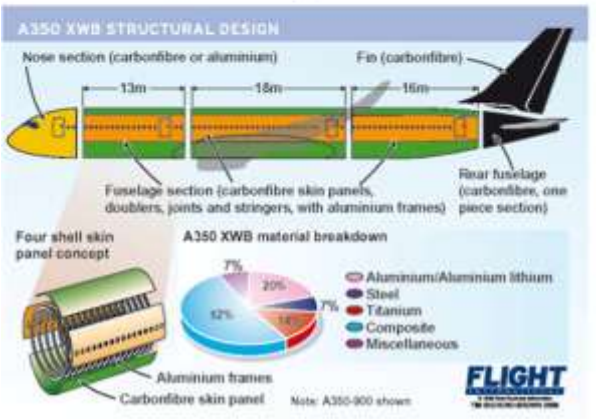
Gambar 11. 15 Struktur Material Komposit

(Sumber : AI-generated image)

Kombinasi ini menghasilkan material yang ringan, kuat, tahan korosi, serta memiliki kinerja tinggi, sehingga banyak dimanfaatkan dalam bidang konstruksi, otomotif, dirgantara, dan industri teknik. Struktur material komposit ditunjukkan pada Gambar 11.10.



(A)



(a)



(b)



(c)

Gambar 11. 16 (a) Badan Pesawat Boeing 787 yang 50% Terdiri dari CFRP, (b) Komponen Interior Mobil Listrik dari Komposit Serat Rami, (c) Raket Tenis Serat Karbon. (Sumber: Matthews & Rawlings, 2014; Tresna, 2024)

Tabel 11. 5 Perbandingan Komposit Serat Karbon (CFRP) vs Paduan Aluminium

Properti	CFRP (epoksi/serat karbon)	Aluminium 7075
Kekuatan tarik (MPa)	1200–1500	500–600
Modulus elastisitas (GPa)	70–150 (tergantung orientasi)	71
Densitas (g/cm^3)	1,5–1,6	2,8
Rasio kekuatan/berat	Sangat tinggi	Sedang

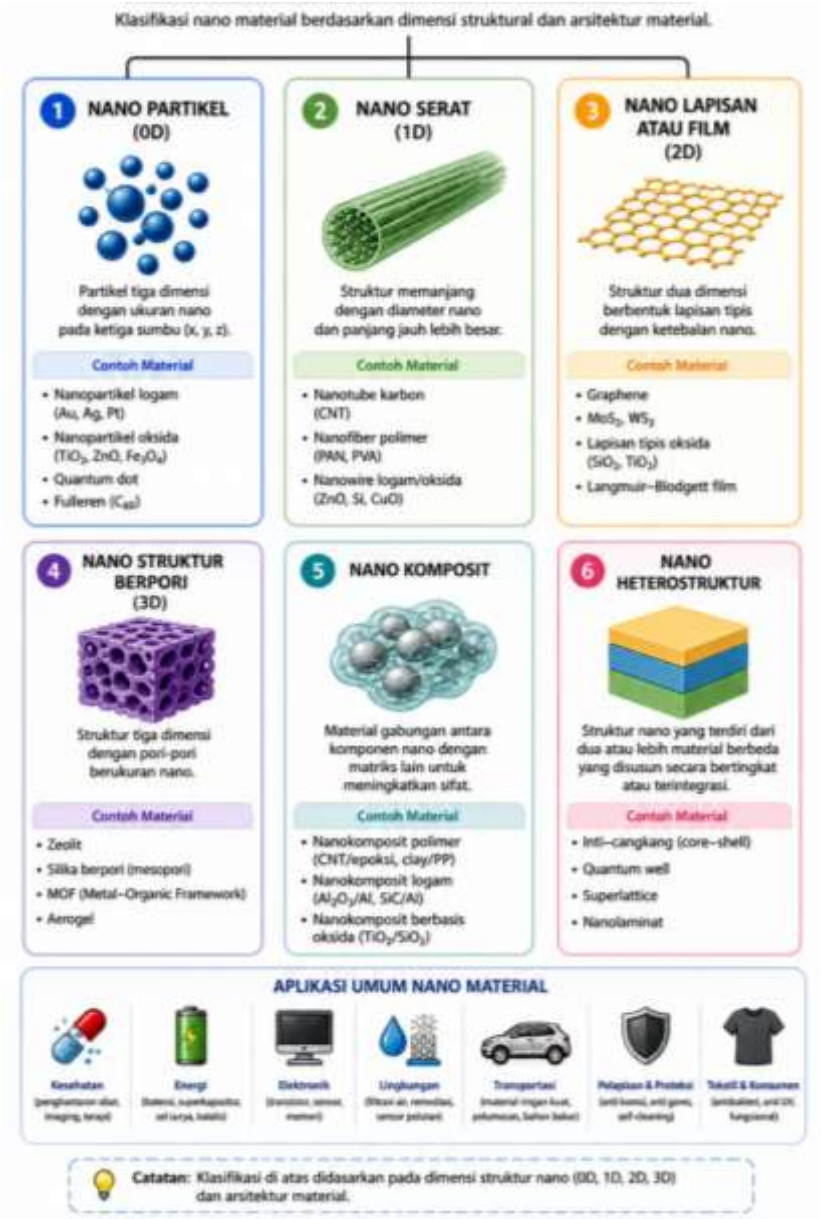
Sumber: Matthews & Rawlings (2014); Wijaya (2020)

Komposit berbasis serat alam seperti rami (*ramie*), bambu, dan sabut kelapa semakin berkembang untuk aplikasi yang ramah lingkungan. Penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa *prepreg* serat rami dengan matriks *Polylactic Acid* (PLA) berpotensi digunakan pada komponen interior kendaraan listrik, seperti *dashboard* dan jok (Tresna, 2024).

11.4 Material Canggih dan Tren Masa Depan

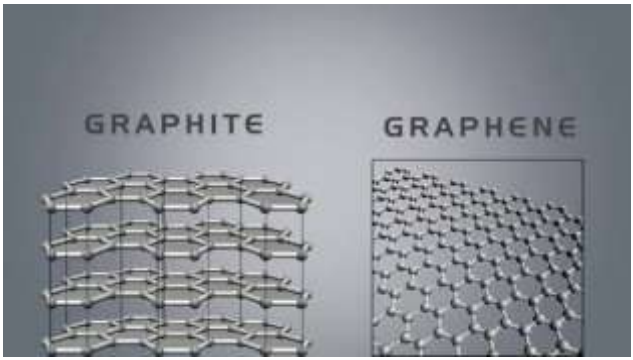
11.4.1 Nanomaterial

Nanomaterial memiliki ukuran butir kurang dari 100 nm, sehingga menunjukkan sifat yang secara fundamental berbeda dibandingkan material *bulk*. Salah satu contoh paling dikenal adalah *graphene*, yaitu lembaran karbon setebal satu atom yang memiliki konduktivitas listrik dan kekuatan mekanik yang sangat tinggi.



Gambar 11. 17 Diagram Jenis Material Nano

(Sumber : AI-generated image)



Gambar 11. 18 Ilustrasi Struktur Graphene (Kisi Heksagonal) dan Perbandingan Skala Nano (Rambut Manusia ~80.000 nm, Graphene ~0,3 nm).

(Sumber: www.hmtk.ft.uns.ac.id)

Aplikasi *nanomaterial* meliputi berbagai bidang, seperti transistor skala nano, baterai *lithium-ion* berkapasitas tinggi, sensor gas, pelapis antimikroba, serta sistem penghantaran obat terarah (*targeted drug delivery*). Di Indonesia, BRIN (2021) telah mengembangkan nanokomposit untuk aplikasi kemasan pangan aktif.

11.4.2 Material Cerdas (*Smart Materials*)

Material cerdas (*smart materials*) memiliki kemampuan untuk merespons perubahan lingkungan, seperti suhu, tekanan, serta medan listrik atau magnet, secara terkendali. Tabel 11.6 merangkum berbagai jenis material cerdas beserta karakteristiknya.

Tabel 11. 6 Jenis – Jenis Material Cerdas dan Aplikasinya

Jenis Material	Prinsip Respons	Contoh Aplikasi
Piezoelektrik	Tekanan → tegangan listrik	Pemantik gas, sensor tekanan ban
Shape memory alloy (SMA)	Suhu → perubahan bentuk	Stent medis, aktuator pesawat
Magnetostriktif	Medan magnet → perubahan bentuk	Sonar, sensor bawah air
Elektrokromik	Tegangan → perubahan warna	Kaca cerdas (smart window)

Sumber: Jain *et al*. (2024); Kementerian ESDM (2021)

Paduan *Shape Memory Alloy* (SMA) berbasis nikel-titanium (*Nitinol*) memiliki kemampuan kembali ke bentuk semula setelah mengalami pemanasan, sehingga banyak dimanfaatkan dalam prosedur medis minimal invasif. Selain itu, material piezoelektrik seperti *Lead Zirconate Titanate* (PZT) digunakan untuk memanen energi dari getaran (*energy harvesting*) (Gardiner, 2025).

11.4.3 Material Berkelanjutan (*Sustainable Materials*)

Meningkatnya kesadaran terhadap lingkungan mendorong pengembangan material yang dapat didaur ulang, berasal dari sumber terbarukan, serta memiliki jejak karbon yang rendah. Gambar 11.8 menampilkan beberapa contoh material berkelanjutan yang dikembangkan di Indonesia.



(a)



(b)

Gambar 11. 19 (a) Papan Panel Dari Komposit Serat Bambu dan Resin Daur Ulang, (b) Komponen Interior Mobil Listrik dari Serat Rami/ PLA.

(Sumber: Cikal, 2025; Tresna, 2024)

Di Indonesia, penelitian mengenai komposit berbasis serat alam seperti bambu, rami, sabut kelapa, dan tandan kosong kelapa sawit berkembang pesat. Cikal (2025) melaporkan bahwa komposit serat sabut kelapa dengan matriks pati berpotensi digunakan sebagai bahan alternatif papan partikel. Selain itu, Kementerian Perindustrian (2021) telah menetapkan peta jalan pengembangan material komposit nasional guna mengurangi ketergantungan impor serta mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya hayati.

11.5 Studi Kasus Aplikasi Material Teknik di Indonesia

Studi Kasus 1 : Rangka eSAF Sepeda Motor Honda

Rangka *Enhanced Smart Architecture Frame* (*eSAF*) merupakan teknologi rangka sepeda motor Honda yang menggunakan pelat baja yang dibentuk melalui proses penekukan dan penyambungan dengan pengelasan laser. Desain ini menghasilkan struktur yang sekitar 8% lebih ringan, serta meningkatkan efisiensi dan kelincahan kendaraan.

Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) telah melakukan kajian terhadap rangka *eSAF* pada sepeda motor Honda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rangka tersebut menggunakan baja tarik tinggi (*High Tensile Steel*) yang dilapisi dengan metode *Cathodic Electro Deposition* (*CED*) untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Temuan ini menjadi salah satu rujukan penting dalam pengembangan standar keselamatan kendaraan di Indonesia (KNKT, 2023).

Studi Kasus 2 : Komposit Serat Rami untuk Otomotif

Tim peneliti dari Universitas Indonesia mengembangkan *prepreg* ramah lingkungan berbasis serat rami dan *Polylactic Acid* (PLA) untuk aplikasi interior mobil listrik. Material ini memiliki kekuatan tarik hingga 85 MPa dengan densitas sekitar 1,2 g/cm^3, serta lebih ringan sekitar 20% dibandingkan komposit serat kaca konvensional (Tresna, 2024; Lololau *et al*., 2024).



Gambar 11. 20 Penelitian Komposit Serat Rami Untuk Interior Mobil

(Sumber : AI-generated image)



(a)



(b)

Gambar 11. 21 (a) Rangka eSAF, (b) Serat Rami/PLA.

(Sumber: (a) Honda, (b) UNY)

Tabel 11. 7 Ringkasan studi kasus material di Indonesia

Kasus	Material Utama	Aplikasi	Temuan Utama	Sumber
Rangka eSAF	Baja tarik tinggi	Rangka sepeda motor	Pelapisan CED efektif cegah korosi	KNKT, 2023
Prepreg serat rami	Rami + PLA	Interior mobil listrik	Kekuatan 85 MPa, ringan 20%	Tresna, 2024

Aplikasi material teknik merupakan hasil akhir dari pemahaman hubungan struktur–sifat–pemrosesan. Logam masih menjadi pilihan utama untuk aplikasi struktural,

keramik digunakan pada kondisi suhu tinggi dan aplikasi biomedis, polimer dimanfaatkan untuk produk ringan dan fleksibel, sedangkan komposit unggul dalam rasio kekuatan terhadap berat.

Perkembangan ke depan mengarah pada pemanfaatan *nanomaterial*, *smart materials*, dan material berkelanjutan. Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan komposit berbasis serat alam, yang didukung oleh kebijakan industri hijau.

BAB 12

MATERIAL UNTUK ENERGI DAN LINGKUNGAN

Material untuk energi dan lingkungan dalam Teknik Sipil merupakan material konstruksi yang dirancang, dipilih dan diaplikasikan dengan mempertimbangkan efisiensi energi, keberlanjutan lingkungan serta dampak dan siklus hidup material terhadap ekosistem. Dalam konteks perkembangan ilmu teknik sipil modern, material tidak lagi hanya dipandang sebagai elemen pembentuk struktur semata, tetapi juga sebagai komponen penting yang mempengaruhi konsumsi energi, emisi karbon, kenyamanan bangunan dan kualitas lingkungan secara keseluruhan. Sektor konstruksi merupakan salah satu sektor dengan konsumsi sumber daya alam terbesar di dunia. Proses produksi material seperti semen, baja, aluminium dan aspal memerlukan energi yang tinggi serta menghasilkan emisi karbon dalam jumlah besar. Oleh sebab itu pemilihan material konstruksi menjadi faktor penting dalam upaya mengurangi dampak negatif pembangunan terhadap lingkungan. Konsep pembangunan berkelanjutan mendorong penggunaan material yang tidak hanya kuat dan ekonomis tetapi juga hemat energi, dapat di daur ulang, memiliki umur layan panjang dan menghasilkan emisi lingkungan yang rendah.

Dalam praktik rekayasa sipil, penggunaan material ramah lingkungan dapat diterapkan pada bangunan gedung, jalan raya, sistem drainase, bendungan, maupun infrastruktur perkotaan lainnya. Penerapan teknologi material modern seperti *green concrete, pervious concrete,* material duar ulang dan material insulasi termal menunjukkan bahwa inovasi material memiliki peran besar dalam mendukung pembangunan berkelanjutan. Material untuk energi dan lingkungan juga berkaitan erat dengan konsep efisiensi energi bangunan. Material tertentu mampu mengurangi perpindahan panas, meningkatkan pencahayaan alami atau membantu mengurangi kebutuhan pendinginan ruangan sehingga konsumsi energi operasional bangunan dapat ditekan. Dengan demikian, pemahaman mengenai karakteristik dan pemanfaatan meterial berkelanjutan menjadi kompetensi penting bagi mahasiswa teknik sipil.

Material untuk energi dan lingkungan dalam teknik sipil merupakan kelompok material konstruksi yang dirancang atau dipilih dengan mempertimbangkan efisiensi energi, keberlanjutan lingkungan dan dampak siklus hidupnya terhadap ekosistem. Dalam konteks pembangunan modern, sektor konstruksi memiliki kontribusi signifikan terhadap konsumsi energi global dan emisi karbon sehingga pemilihan material menjadi salah satu aspek strategis dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan (Cabeza *et al*, 2014). Industri konstruksi tidak lagi hanya menitikberatkan pada kekuatan dan durabilitas material, tetapi juga pada kemampuan material untuk mendukung efisiensi energi bangunan dan meminimalkan dampak lingkungan sepanjang siklus hidupnya (Kibert, 2016)

Konsep pembangunan berkelanjutan dalam bidang teknik sipil menekankan keseimbangan antara kebutuhan pembangunan infrastruktur dan perlindungan lingkungan. Oleh karena itu pemilihan material yang tepat dapat berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca,

efisiensi energi operasional bangunan serta pengurangan ekslopitasi sumber daya alam (Ashby, 2013).

12.1 Konsumsi Energi dan Dampak Lingkungan

12.1.1 Material Konstruksi

Material konstruksi memiliki hubungan yang sangat erat dengan konsumsi energi global dan kerusakan lingkungan. Proses produksi material seperti semen, baja, kaca, aluminium dan aspal memerlukan energi dalam jumlah besar, baik dalam bentuk energi listrik maupun energi panas. Energi tersebut digunakan mulai dari proses penambangan bahan baku, pengolahan material, proses manufaktur hingga transportasi menuju lokasi proyek. Semakin tinggi kebutuhan energi pada proses produksi material, maka semakin besar pula dampak lingkungan yang ditimbulkan.

Salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi dampak energi suatu material adalah *embodied energy. Embodied energy* menunjukkan jumlah total energi yang digunakan sepanjang proses produksi material sehingga siap digunakan dalam konstruksi. Material seperti aluminium dan baja memiliki *embodied energy* tinggi karena proses produksinya memerlukan temperatur tinggi dan teknologi manufaktur kompleks. Sebaliknya, material alami seperti kayu memiliki *emboided energy* relatif lebih rendah. Selain *emboided energy*, sektor industri juga menghasilkan emisi karbon yang besar. Industri semen portland menjadi salah satu penyumbang emisi karbon terbesar di dunia akibat proses pembakaran klinker dan penggunaan bahan bakar fosil pada kiln. Emisi karbon dari sektor konstruksi memberikan kontribusi terhadap

peningkatan gas rumah kaca yang berdampak pada perubahan iklim global.

Dampak lingkungan lainnya dari penggunaan material konstruksi meliputi eksploitasi sumber daya alam, pencemaran udara, kerusakan lahan akibat penambangan serta meningkatknya limbah konstruksi. Oleh sebab itu, pengembangan material ramah lingkungan dan penggunaan teknologi konstruksi berkelanjutan menjadi kebutuhan penting dalam pembangunan modern. Dalam teknik sipil upaya pengurangan dampak lingkungan dapat dilakukan melalui penggunaan material alternatif, pemanfaatan limbah industri sebagai bahan tambah, optimalisasi desain struktur dan penerapan prinsip *reduce, reuse* dan *recycle* dalam proyek konstruksi. Pendekatan ini tidak hanya menurunkan dampak lingkungan tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya.

Setiap material konstruksi memiliki *emboided energy*, yaitu total energi yang dibutuhkan selama proses ekstraksi bahan baku, pengolahan, manufaktur, transportasi hingga pemasangan di lokasi konstruksi. Material seperti baja dan semen memiliki *emboided energy* yang relatif tinggi dibandingkan kayu atau material alami lainnya (Hammond and Jones, 2008). Selain itu, produksi semen portland sebagi bahan utama beton menyumbang emosi karbon yang signifikan akibat proses kalsinasi batu kapur dan konsumsi energi termal pada kiln (Scrivener *et al*, 2018).

Jejak karbon material konstruksi menjadi indikator penting dalam mengevaluasi keberlanjutan proyek konstruksi. Oleh sebab itu, pengembangan marterial rendah karbon seperti *geopolymer concrete*, penggunaan material daur ulang dan optimasi desain struktur

menjadi strategi utama dalam mengurangi dampak lingkungan sektor konstruksi.

Tabel 12. 1 Contoh Embodied Energy Material Konstruksi

Material	Embodied Energy (MJ/kg)	Dampak Lingkungan
Baja	20 – 35	Emisi CO_2 tinggi
Semen Portland	4 – 5	Produksi karbon tinggi
Beton	0,8 – 1,5	Tergantung komposisi semen
Kayu	2 – 3	Lebih ramah lingkungan
Aluminium	150 – 200	Energi produksi sangat tinggi

(Sumber : Hammond and Jones, 2008. Inventory of Carbon and Energy (ICE) University of Bath)

12.2 Material Konstruksi Hemat Energi

Material konstruksi hemat energi merupakan material yang mampu membantu mengurangi konsumsi energi selama masa operasional bangunan maupun infrastruktur. Dalam bangunan, sebagian besar konsumsi energi digunakan untuk sistem pendinginan, pemanasan, ventilasi dan pencahayaan. Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat dapat membentu meningkatan efisiensi energi bangunan secara signifikan.

Material hemat energi umumnya memiliki kemampuan mengurangi perpindahan panas, memantulkan radiasi matahari atau menyimpan energi termal untuk menjaga kestabilan suhu ruangan. Penggunaan material hemat energi

sangat penting terutama pada wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki intensitas radiasi matahari tinggi.

Penerapan material hemat energi tidak hanya berdampak pada pengurangan konsumsi listrik tetapi juga meningkatkan kenyamanan termal penghuni bangunan. Selain itu, penggunaan material ini dapat membantu mengurangi emisi karbon akibat penggunaan energi listrik yang berlebihan.

12.2.1 Material Insulasi Termal

Material insulasi termal digunakan untuk mengurangi perpindahan panas melalui elemen bangunan sehingga meningkatkan efisiensi energi bangunan. Prinsip dasar penggunaan insulasi termal adalah memperlambat aliran panas dari lingkungan bersuhu tinggi menuju lingkungan bersuhu lebih rendah. Dengan demikian kebutuhan energi untuk pendinginan maupun pemanasan ruangan dapat dikurangi.

Pada bangunan di daerah tropis, penggunaan material insulasi termal sangat penting untuk mengurangi panas yang masuk melalui atap dan dinding. Material insulasi bekerja berdasarkan nilai konduktivitas termalnya. Semakin rendah nilai konduktivitas termal suatu material, maka semakin baik kemampuan material tersebut dalam menghambat perpindahan panas. Beberapa material insulasi yang umum digunakan antara lain *glass wool, rock wool, expanded polystyrene (EPS)* dan *polyurethane foam. Glass wool* memiliki struktur serat halus yang mempu memerangkap udara sehingga efektif menghambat panas. *Rock wool* memiliki keunggulan tambahan berupa ketahanan terhadap api. Sementara itu, *polyurethane foam* dikenal memiliki kemampuan insulasi yang sangat baik dengan ketebalan relatif kecil.

Selain pada bangunan gedung, material insulasi termal juga digunakan pada sistem perpipaan, ruang pendingin dan infrastruktur energi untuk menjaga efisiensi termal sistem. Material ini bekerja dengan cara menurunkan konduktivitas termal dinding, atap atau lantai sehingga mengurangi beban pendinginan maupun pemanasan bangunan (Jelle, 2011).

Tabel 12. 2 Nilai Konduktivitas Termal Material Insulasi

Material	Konduktivitas Termal (W/mK)	Karakteristik
Glass wool	0,035 – 0,045	Ringan dan ekonomis
Rock Wool	0,035 – 0,050	Tahan api
Expanded Polystyrene (EPS)	0,032 – 0,038	Isolasi baik
Polyurethane Foam	0,020 – 0,030	Efisiensi tinggi

(Sumber : Jelle, 2011)

12.2.2 Material Reflektif dan *Cool Materials*

Cool materials merupakan material dengan nilai reflektansi surya tinggi dan emisivitas termal tinggi yang mampu mengurangi penyerapan panas matahari pada permukaan bangunan atau perkerasan. Material ini bekerja dengan memantulkan sebagian besar radiasi matahari sehingga suhu permukaan menjadi lebih rendah dibandingkan material konvensional. Penggunaan *cool roof* dan *reflective pavement* terbukti mampu menurunkan suhu permukaan serta mengurangi efek *urban heat island* (Santamouris, 2013).

Fenomena *urban heat island* terjadi ketika kawasan perkotaan memiliki suhu lebih tinggi dibandingkan wilayah sekitarnya akibat dominasi permukaan keras seperti beton dan aspal yang menyerap panas matahari. Kondisi ini menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi untuk pendingin bangunan serta menurunkan kenyamanan lingkungan perkotaan. Material reflektif biasanya menggunakan lapisan berwarna terang atau material khusus yang memiliki nilai albedo tinggi. Albedo merupakan kemampuan suatu permukaan dalam memantulkan radiasi matahari. Semakin tinggi nilai albedo suatu material maka semakin sedikit panas yang diserap oleh permukaan tersebut.

Beberapa contoh *cool materials* yang umum digunakan antara lain cat reflektif, membran atap reflektif, keramik berlapis khusus dan perkerasan beton berwarna terang. Pada perkerasan jalan, penggunaan *reflective pavement* dapat membantu menurunkan suhu permukaan jalan sehingga mengurangi deformasi akibat temperatur tinggi.

12.2.3 Material Penyimpan Energi Termal

Phase Change Materials (PCM) merupakan material yang memiliki kemampuan menyerap dan melepaskan energi panas dalam jumlah besar melalui proses perubahan fase, umumnya dari fase padat ke cair atau sebaliknya. Berbeda dengan material konvensional yang hanya menyimpan panas secara sensibel, PCM memanfaatkan panas laten sehingga mampu menyerap energi tanpa menyebabkan perubahan temperatur yang signifikan selama proses perubahan fase berlangsung. Ketika temperatur lingkungan meningkat dan mencapai titik leleh PCM, material akan menyerap panas berlebih dan berubah menjadi cair. Sebaliknya, saat temperatur menurun, PCM akan melepaskan kembali energi panas

yang tersimpan dan kembali ke fase padat. Mekanisme ini memungkinkan PCM berfungsi sebagai media penyimpan energi termal yang efektif dalam menjaga kestabilan suhu ruang bangunan (Sharma *et al*, 2009).

Dalam bidang konstruksi dan bangunan hemat energi, PCM banyak diaplikasikan pada dinding, plafon, lantai, panel gypsum, maupun sistem ventilasi untuk meningkatkan kenyamanan termal penghuni. Penggunaan PCM pada elemen bangunan dapat membantu mengurangi fluktuasi temperatur harian, terutama pada daerah dengan perbedaan suhu siang dan malam yang cukup tinggi. Pada siang hari, PCM menyerap panas matahari yang masuk ke dalam bangunan sehingga suhu ruangan tidak meningkat secara drastis. Selanjutnya, pada malam hari panas yang tersimpan akan dilepaskan secara perlahan sehingga ruangan tetap hangat dan nyaman. Dengan mekanisme tersebut, kebutuhan penggunaan pendingin maupun pemanas ruangan dapat ditekan sehingga konsumsi energi bangunan menjadi lebih efisien dan ramah lingkungan (Zalba *et al*., 2003).

Jenis PCM yang digunakan dalam bangunan umumnya dibedakan menjadi tiga kelompok utama, yaitu PCM organik, anorganik, dan eutektik. PCM organik seperti parafin memiliki stabilitas kimia yang baik dan tidak korosif, namun konduktivitas termalnya relatif rendah. PCM anorganik, seperti *hydrated salts*, memiliki kapasitas penyimpanan panas yang tinggi tetapi berpotensi mengalami korosi dan pemisahan fase. Sementara itu, PCM eutektik merupakan kombinasi dua atau lebih material yang dirancang untuk memperoleh titik leleh tertentu sesuai kebutuhan aplikasi. Pemilihan jenis PCM sangat dipengaruhi oleh temperatur kerja, kapasitas penyimpanan energi, kestabilan siklus termal, serta kompatibilitas material terhadap komponen

bangunan lainnya. Oleh karena itu, pengembangan teknologi PCM terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi termal bangunan berkelanjutan di masa depan.

12.3 Material Ramah Lingkungan untuk Konstruksi

12.3.1 *Green Concrete*

Green concrete merupakan beton yang diproduksi dengan mengurangi dampak lingkungan melalui substitusi sebagian semen Portland dengan material pozzolan seperti *fly ash*, *slag* atau *silica fume*. Penggunaan material substitusi ini dapat menurunkan emisi karbon beton sekaligus meningkatkan beberapa sifat durabilitasnya (Meyer, 2009). Produksi semen portland diketahui menjadi salah satu penyumbang emisi karbon dioksida (CO_2) terbesar dalam industri konstruksi karena proses pembakaran klinker membutuhkan energi tinggi dan menghasilkan emisi gas rumah kaca dalam jumlah besar. Oleh sebab itu pemanfaatan bahan tambahan mineral sebagai pengganti sebagian semen menjadi strategi penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan konsep konstruksi hijau.

Selain mampu mengurangi emisi karbon, penggunaan material pozzolan pada *green concrete* juga memberikan peningkatan terhadap kualitas beton. *Fly ash* dan *slag* misalnya, dapat memperbaiki workability beton serta mengurangi panas hidrasi sehingga resiko retak termal pada beton massa dapat diminimalkan. Reaksi pozzolanik yang terjadi antara material substitusi dan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat tambahan yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan

kepadatan mikrostruktur beton. Kondisi tersebut menjadikan beton lebih tahan terhadap panetrasi air, serangan sulfat, korosi tulangan serta reaksi alkali-silika yang dapat merusak struktur dalam jangka panjang (Mehta & Monteiro, 2014).

Dalam penerapannya *green concrete* juga dapat dikombinasikan dengan penggunaan agregat daur ulang dari limbah konstruksi dan pembongkaran bangunan untuk semakin menekan eksploitasi sumber daya alam. Teknologi ini mendukung prinsip *reduce, reuse* dan *recycle* dalam sektor konstruksi modern. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan agregat daur ulang dengan proporsi tertentu masih mampu menghasilkan kuat tekan yang memenuhi standar konstruksi, terutama untuk bangunan non-struktur maupun struktur ringan. Selain itu, pengembangan *green concrete* saat ini semakin diarahkan pada inovasi beton rendah karbon *(low-carbon concrete)* dan *geopolymer concrete* yang memanfaatkan limbah industri secara optimal sehingga dapat menjadi alternatif material konstruksi masa depan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Tabel 12. 3 Perbandingan Beton Konvensional dan *Green Concrete*

Parameter	**Beton Konvensional**	***Green Concrete***
Emisi CO_2	Tinggi	Lebih rendah
Penggunaan limbah industry	Rendah	Tinggi
Durabilitas	Baik	Umumnya lebih baik

Parameter	Beton Konvensional	*Green Concrete*
Biaya awal	Relatif rendah	Sedikit lebih tinggi

(Sumber : Meyer, 2009)

12.3.2 Material Daur Ulang

Material daur ulang dalam konstruksi meliputi agregat hasil pembongkaran beton, *reclaimed asphalt pavement* (RAP) dan limbah plastik. Penggunaan material daur ulang membantu mengurangi volume limbah konstruksi serta kebutuhan material alam baru (Tam and Tam, 2006). Dalam industri konstruksi modern, pemanfaatan kembali limbah bangunan menjadi salah satu strategi penting untuk mendukung pembangunan berkelanjutan dan efisiensi penggunaan sumber daya alam. Limbah konstruksi yang sebelumnya hanya dibuang ke tempat pembuangan akhir kini dapat diolah kembali menjadi material yang memiliki nilai guna, sehingga mampu mengurangi tekanan terhadap lingkungan akibat keploitasi batuan, pasir dan bahan baku lainnya. Selain itu, penerapan material daur ulang juga berkontribusi dalam menekan biaya transportasi dan pembuangan limbah konstruksi

Agregrat daur ulang yang berasal dari puing beton umumnya digunakan sebagai bahan pengganti agregat kasar pada campuran beton maupun lapisan pondasi jalan. Meskipun kualitasnya dapat sedikit berbeda dibandingkan agregat alami, penggunaan agregat daur ulang dengan proporsi tertentu tetap mampu memenuhi persyaratan teknik konstruksi. Pada perkerasan jalan, *reclaimed asphalt pavement (RAP)* banyak dimanfaatkan kembali sebagai campuran aspal baru karena masih mengandung agregat dan aspal yang dapat digunakan

ulang. Pemanfaatan RAP tidak hanya mengurangi kebutuhan agregat baru, tetapi juga membantu menghemat penggunaan aspal minyak yang harganya relatif mahal dan berasal dari sumber daya tak terbarukan. Teknologi pengolahan dan pencampuran RAP saat ini terus berkembang sehingga kualitas campuran perkerasan daoat tetap terjaga.

Selain agregat dan RAP, limbah plastik juga mulai banyak dimanfaatkan sebagai material tambahan dalam konstruksi, seperti campuran aspal plastik, paving block, bata ringan, maupun bahan komposit bangunan lainnya. Penggunaan limbah plastik pada campuran aspal terbukti dapat meningkatkan stabilitas dan ketahanan terhadap deformasi akibat temperatur tinggi dan beban lalu lintas. Di sisilain, pemanfaatan limbah plastik juga membantu mengurangi pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh akumulasi sampah plastik yang sulit terurai secara alami. Dengan berkembangnya teknologi material, penggunaan material daur ulang diharapkan mampu menjadi solusi inovatif dalam menciptakan konstruksi yang lebih ekonomis, efisien dan ramah lingkungan tanpa mengurangi aspek kekuatan dan keamanan struktur.

12.3.3 Material *Bio-Based*

Material *bio-based* berasal dari sumber hayati terbarukan seperti bambu, serat kelapa atau biomassa. Material ini memiliki potensi sebagai alternatif material konstruksi berkelanjutan karena bersifat renewable dan memiliki emboided energy rendah (Pacheco-Torgal and Jalali, 2011). Jika dibandingkan dengan material konstruksi konvensional seperti baja dan semen yang membutuhkan energi tinggi dalam proses produksinya, material *bio-based* umumnya memerlukan energi pengolahan yang lebih kecil sehingga menghasilkan

emisi karbon yang lebih rendah. Selain itu, beberapa material bio-based memiliki kemampuan menyerap karbon selama masa pertumbuhannya, sehingga dapat membantu mengurangi konsentrasi karbon di atmosfer.

Dalam aplikasi konstruksi, bambu banyak dimanfaatkan sebagai elemen struktur maupun arsitektural karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi dan pertumbuhan yang cepat. Serat alami seperti serat kelapa, serat rami, dan serat jerami juga mulai digunakan sebagai bahan penguat komposit, panel dinding, material insulasi, serta campuran beton ramah lingkungan. Pengembangan material bio-based saat ini semakin didukung oleh inovasi teknologi pengolahan untuk meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan, serangan biologis, dan umur layanan material sehingga dapat memenuhi kebutuhan konstruksi modern yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

12.4 Material untuk Infrastruktur Energi dan Utilitas

Material teknik sipil berperan penting dalam pembangunan infrastruktur energi seperti pondasi turbin angin, struktur pembangkit listrik, jaringan pipa dan struktur penyangga panel surya. Material untuk aplikasi ini harus memiliki kekuatan mekanik tinggi, ketahanan korosi serta durabilitas terhadap lingkungan agresif (Bogue, 2012). Infrastruktur energi umumnya beroperasi dalam kondisi lingkungan yang berat seperti paparan kelembaban tinggi, perubahan temperatur ekstrem, tekanan mekanis berulang hingga paparan bahan kimia yang dapat mempercepat kerusakan material. Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat menjadi faktor penting untuk menjamin keamanan,

keandalan dan umur layanan infratruktur dalam jangka panjang.

Pada konstruksi pembangkit energi terbarukan, seperti turbin angin dan panel surya, beton bertulang dan baja struktural menjadi material utama yang banyak digunakan. Pondasi turbin angin memerlukan beton berkekuatan tinggi untuk menahan beban dinamis akibat putaran turbin dan gaya angin yang terus berubah. Sementara itu, baja galvanis atau baja tahan korosi digunakan pada menara turbin dan struktur penyangga panel surya agar mampu bertahan terhadap paparan cuaca luar ruang dalam waktu lama. Pada wilayah pesisir atau lingkungan laut, material juga harus memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi akibat kandungan garam yang dapat mempercepat degradasi struktur. Oleh sebab itu, pelapisan pelindung, penggunaan baja tahan karat, maupun material komposit mulai banyak diterapkan untuk meningkatkan ketahanan struktur energi modern.

Selain pada pembangkit energi, material teknik sipil juga memiliki peran penting dalam sistem utilitas seperti jaringan pipa air, gas, dan minyak. Material pipa harus mampu menahan tekanan internal, abrasi, serta serangan kimia dari fluida yang dialirkan. Baja, *ductile iron*, HDPE, dan beton pracetak menjadi beberapa material yang umum digunakan sesuai karakteristik kebutuhan jaringan utilitas. Perkembangan teknologi material saat ini juga mengarah pada penggunaan material komposit dan *smart materials* yang mampu memantau kondisi struktur secara real time. Dengan dukungan material yang semakin inovatif, pembangunan infrastruktur energi dan utilitas diharapkan dapat menjadi lebih efisien, aman, tahan lama, dan mendukung keberlanjutan sistem energi masa depan.

12.5 Material untuk Pengendalian Lingkungan dalam Teknik Sipil

12.5.1 Material Pengolahan Air dan Air Limbah

Karbon aktif, zeolit dan membran filtrasi banyak digunakan pada sistem pengolahan air karena kemampuannya dalam adsorpsi dan pemisahan kontaminan (Fu and Wang, 2011).

Karbon aktif memiliki luas permukaan yang sangat besar sehingga efektif menyerap senyawa organik, bau, warna, serta zat pencemar berbahaya dalam air. Zeolit, yang merupakan material berpori alami maupun sintetis, banyak dimanfaatkan untuk proses pertukaran ion dalam mengurangi kandungan logam berat seperti amonium, timbal, dan kadmium. Sementara itu, teknologi membran filtrasi seperti mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, dan reverse osmosis berkembang pesat karena mampu menghasilkan kualitas air yang lebih baik dengan efisiensi penyaringan tinggi. Penggunaan material-material tersebut sangat penting dalam mendukung penyediaan air bersih dan pengolahan air limbah yang semakin dibutuhkan akibat meningkatnya pertumbuhan penduduk, aktivitas industri, serta pencemaran lingkungan.

12.5.2 Material Drainase Berkelanjutan

Pervious concrete dan *porous asphalt* digunakan dalan sistem drainase berkelanjutan untuk meningkatkan infiltrasi air hujan ke tanah dan mengurangi limpasan permukaan (ACI 533R-10, 2010). Material ini memiliki struktur berpori yang memungkinkan air mengalir langsung menembus lapisan perkerasan menuju tanah di bawahnya, sehingga dapat membantu mengurangi genangan dan risiko banjir

perkotaan. Selain meningkatkan resapan air tanah, penggunaan material drainase berkelanjutan juga berperan dalam memperbaiki kualitas air hujan melalui proses filtrasi alami sebelum masuk ke sistem air tanah. *Pervious concrete* banyak diaplikasikan pada area parkir, trotoar, jalur pejalan kaki, dan kawasan perkotaan ramah lingkungan, sedangkan porous asphalt sering digunakan pada jalan dengan volume lalu lintas tertentu. Penerapan teknologi ini menjadi bagian penting dalam konsep *sustainable urban drainage system* (SUDS) yang mendukung pengelolaan air hujan secara lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan..

12.5.3 Material Pengendalian Polusi

Fotokatalitik concrete berbasis titanium dioxide (TiO_2) dapat membantu menguraikan polutan udara seperti NOx melalui proses fotokatalisis saat terkena sinar ultraviolet (Chen and Poon, 2009). Ketika permukaan beton yang mengandung TiO_2 terpapar cahaya matahari, akan terjadi reaksi kimia yang menghasilkan radikal aktif untuk mengoksidasi senyawa pencemar menjadi zat yang lebih aman bagi lingkungan. Teknologi ini tidak hanya membantu menurunkan tingkat polusi udara di kawasan perkotaan, tetapi juga memiliki efek *self-cleaning* yang membuat permukaan beton lebih tahan terhadap noda dan kotoran. *Fotokatalitik concrete* telah mulai diterapkan pada dinding bangunan, trotoar, terowongan, dan permukaan jalan di beberapa negara sebagai bagian dari upaya menciptakan infrastruktur ramah lingkungan. Pengembangan material pengendalian polusi semacam ini menunjukkan bahwa material konstruksi modern tidak hanya berfungsi sebagai elemen struktural, tetapi juga dapat berkontribusi aktif dalam meningkatkan kualitas lingkungan perkotaan.

Tabel 12. 4 Material Untuk Pengendali Lingkungan

Material	Fungsi	Aplikasi
Karbon aktif	Adsorben	Pengolahan air
Zeolit	Penyerap ion	Limbah cair
Pervious Concrete	Infoltrasi air	Drainase perkotaan
TiO_2 Concrete	Fotokatalisis	Pengendalian polusi udara

(Sumber : Fu and Wang, 2011; ACI 522R-10, 2010)

12.6 Durabilitas dan Ketahanan Lingkungan

Durabilitas material konstruksi menentukan umur layanan struktur dalam menghadapi pengaruh lingkungan seperti korosi, serangan sulfat, karbonasi dan penetrasi klorida. Material yang brekelanjutan harus tetap memenuhi persyaratan durabilitas agar tidak menimbulkan kebutuhan perbaikan dini yang justru meningkatkan dampak lingkungan total (Neville, 2011). Kerusakan material akibat faktor lingkungan dapat menyebabkan penurunan kekuatan struktur, retak, pengelupasan beton, hingga kegagalan konstruksi apabila tidak dikendalikan dengan baik. Oleh karena itu, aspek durabilitas menjadi salah satu pertimbangan utama dalam perencanaan dan pemilihan material teknik sipil, terutama pada infrastruktur yang berada di lingkungan agresif seperti wilayah pantai, kawasan industri, maupun daerah dengan tingkat kelembapan tinggi. Material dengan durabilitas yang baik mampu mempertahankan performa struktural dalam jangka panjang sehingga dapat mengurangi frekuensi pemeliharaan, rehabilitasi, dan penggantian struktur.

Untuk meningkatkan ketahanan lingkungan, berbagai teknologi material terus dikembangkan, seperti penggunaan beton mutu tinggi, bahan tambah pozzolan, pelapis pelindung anti korosi, serta material komposit yang memiliki ketahanan kimia lebih baik. Penggunaan *fly ash, silica fume, dan slag* pada beton misalnya, dapat memperkecil porositas sehingga menghambat masuknya ion klorida dan zat agresif lainnya ke dalam struktur beton. Selain itu, perlindungan terhadap tulangan baja melalui galvanisasi, *coating epoxy*, maupun penggunaan *stainless steel* juga menjadi metode penting untuk mencegah korosi pada struktur beton bertulang. Konsep durability design saat ini semakin menekankan pentingnya keseimbangan antara kekuatan, umur layanan, biaya pemeliharaan, dan dampak lingkungan agar infrastruktur yang dibangun dapat berfungsi secara optimal, aman, dan berkelanjutan sepanjang siklus hidupnya.

Tabel 12. 5 Faktor Penyebab Kerusakan Material Konstruksi

Faktor Lingkungan	Dampak Pada Material
Korosi	Kerusakan tulangan baja
Sulfat	Retak dan ekspansi beton
Klorida	Mempercepat korosi
Siklus Basah - Kering	Penurunan durabilitas

(Sumber : Neville, 2011)

12.7 Penilaian Keberlanjutan Material Konstruksi

Life Cycle Assesment (LCA) digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan material dari *cradle to grave*, mulai dari ekstraksi bahan baku hingga akhir masa pekai. Pendekatan ini membantu insinyur dalam memilih material berdasarkan kinerja lingkungan secara menyeluruh

(ISO 14040, 2006). Dalam metode LCA, berbagai aspek dianalisis secara sistematis, seperti konsumsi energi, emisi gas rumah kaca, penggunaan air, potensi pencemaran, serta limbah yang dihasilkan selama siklus hidup material. Dengan pendekatan tersebut, suatu material tidak hanya dinilai berdasarkan kekuatan atau biaya awalnya, tetapi juga berdasarkan dampak lingkungannya dalam jangka panjang. Sebagai contoh, material dengan harga awal lebih tinggi dapat dianggap lebih berkelanjutan apabila memiliki umur layanan lebih panjang, kebutuhan pemeliharaan lebih rendah, dan dapat didaur ulang setelah masa pakainya berakhir. Oleh karena itu, penerapan LCA menjadi alat penting dalam mendukung pengambilan keputusan pada konstruksi berkelanjutan serta membantu pengurangan jejak karbon sektor teknik sipil secara keseluruhan.

12.8 Inovasi Material Masa Depan Untuk Teknik Sipil

Perkembangan teknologi material menghasilkan inovasi seperti *self healing concrete, carbon capture concrete dan smart materials* yang mampu meningjatkan keberlanjutan serta efisiensi pemeliharaan infratsruktur di masa depan (Van Tittelboom and De Belie, 2013). *Self-healing concrete*, misalnya, dirancang untuk memperbaiki retakan secara otomatis melalui reaksi kimia atau aktivitas bakteri tertentu yang menghasilkan kalsium karbonat untuk menutup celah pada beton. Teknologi ini berpotensi memperpanjang umur layanan struktur dan mengurangi biaya perawatan secara signifikan. Sementara itu, *carbon capture concrete* dikembangkan dengan kemampuan menyerap dan menyimpan karbon dioksida selama proses produksi maupun masa penggunaan beton sehingga dapat membantu menekan emisi karbon industri konstruksi. Selain itu, smart materials seperti sensor terintegrasi, *piezoelectric materials,*

dan shape memory alloys mulai diterapkan untuk memungkinkan struktur memantau kondisi kerusakan, deformasi, atau perubahan beban secara real time. Inovasi-inovasi tersebut menunjukkan bahwa material konstruksi masa depan tidak hanya dituntut kuat dan tahan lama, tetapi juga adaptif, cerdas, dan berkontribusi terhadap pembangunan infrastruktur yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Tabel 12. 6 Inovasi Material Masa Depan

Inovasi Material	Fungsi
Self-healing concrete	Menutup retak otomatis
Smart materials	Monitoring struktur
Carbon capture concrete	Menyerap karbon
Nanomaterial beton	Meningkatkan kekuatan

12.9 Implementasi Material Berkelanjutan

Implementasi material berkelanjutan dalam teknik sipil telah diterapkan pada bangunan hijau , perkerasan permeabel dan beton geopolymer pada berbagai proyek konstruksi modern. Studi kasus ini menunjukkan bahwa penerapan material ramah lingkungan dapat meningkatkan efisiensi sumber daya sekaligus menurunkan dampak lingkungan proyek. Pada bangunan hijau *(green building),* penggunaan material seperti beton rendah karbon, kaca hemat energi, panel insulasi termal, dan material daur ulang terbukti mampu mengurangi konsumsi energi operasional bangunan. Selain itu, penerapan sistem konstruksi berkelanjutan juga membantu meningkatkan kualitas lingkungan dalam ruangan, mengurangi emisi karbon, serta memperpanjang umur layanan bangunan. Banyak negara

telah menerapkan standar sertifikasi bangunan hijau seperti LEED dan Greenship untuk mendorong penggunaan material yang lebih ramah lingkungan dalam sektor konstruksi.

Dalam bidang transportasi dan drainase perkotaan, penggunaan perkerasan permeabel seperti *pervious concrete* dan *porous asphalt* menjadi solusi untuk mengurangi limpasan permukaan dan meningkatkan infiltrasi air hujan ke dalam tanah. Beberapa kota modern telah mengaplikasikan teknologi ini pada area parkir, trotoar, jalur pedestrian, dan kawasan perkotaan dengan risiko genangan tinggi. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem perkerasan permeabel mampu membantu pengendalian banjir perkotaan sekaligus mendukung pengisian kembali air tanah secara alami. Selain manfaat hidrologis, penggunaan material permeabel juga dapat mengurangi efek urban heat island karena permukaan perkerasan cenderung memiliki suhu lebih rendah dibandingkan perkerasan konvensional.

Sementara itu, beton geopolymer menjadi salah satu inovasi material berkelanjutan yang mulai diterapkan pada berbagai proyek infrastruktur karena mampu mengurangi penggunaan semen Portland secara signifikan. Material ini umumnya memanfaatkan limbah industri seperti fly ash dan slag sebagai bahan pengikat utama sehingga dapat menekan emisi karbon dari proses produksi beton. Beberapa penelitian dan proyek percontohan menunjukkan bahwa beton geopolymer memiliki kuat tekan tinggi, ketahanan kimia yang baik, serta durabilitas yang memadai untuk aplikasi struktural maupun non-struktural. Keberhasilan implementasi berbagai material berkelanjutan tersebut menunjukkan bahwa sektor teknik sipil memiliki peluang besar untuk mendukung pembangunan berkelanjutan melalui pemilihan material yang lebih efisien, inovatif, dan ramah lingkungan.

Pemilihan material dalam teknik sipil memiliki pengaruh besar terhadap efisiensi energi, keberlanjutan lingkungan dan durabilitas infrastruktur. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik material untuk energi dan lingkungan menjadi kompetensi penting bagi insinyur sipil masa depan.

BAB 13
MASA DEPAN MATERIAL TEKNIK

Dalam beberapa dekade terakhir. perkembangan material teknik menunjukkan evolusi yang sangat signifikan seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi rekayasa. Pada tahap awal. pemilihan material lebih didasarkan pada ketersediaan alam dan pengalaman empiris. seperti penggunaan logam konvensional dan keramik tradisional dalam aplikasi teknik. Meski demikian. seiring berkembangnya ilmu material. pendekatan tersebut bergeser menuju desain material berbasis pemahaman ilmiah mengenai hubungan antara struktur, sifat, proses, dan kinerja material. Paradigma ini menegaskan bahwa performa suatu material tidak hanya ditentukan oleh komposisi kimianya. tetapi juga oleh struktur atomik, mikrostruktur, serta proses manufaktur yang sering dimanfaatkan (Callister & Rethwisch, 2020; Ashby *et al*., 2019). Dalam praktik teknik mesin, konsep ini cukup penting untuk dipahami.

Pemahaman fundamental mengenai struktur atom. ikatan kimia, serta struktur kristal yang mungkin telah dibahas pada bab-bab sebelumnya menjadi landasan utama dalam pengembangan material teknik modern. Hubungan antara struktur kristal dan cacat kristal, misalnya, sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik seperti kekuatan, keuletan, dan ketahanan aus material. Demikian pula, sifat termal, elektrik, dan magnetik material sangat bergantung pada konfigurasi atom dan interaksi antar partikel

penyusunnya. Karena itu. kemajuan dalam teknik karakterisasi material serta pemodelan komputasional memungkinkan rekayasa material dilakukan secara lebih terarah dan presisi. akibatnya bisa menghasilkan material dengan performa yang bisa disesuaikan untuk kebutuhan aplikasi tertentu (Smith & Hashemi, 2010; Shackelford, 2015). Mahasiswa teknik biasanya menemui konsep ini ketika mempelajari ilmu material.

Material masa depan tidak hanya dituntut memiliki kekuatan tinggi atau massa jenis yang ringan. tetapi juga harus memenuhi kriteria keberlanjutan, efisiensi energi, serta ramah lingkungan. Tuntutan global terhadap pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan sumber daya secara efisien mendorong pengembangan material yang bisa didaur ulang. memiliki umur pakai panjang, serta diproduksi dengan dampak lingkungan yang minimal. Konsep material berkelanjutan ini selaras dengan pendekatan siklus hidup material (*life cycle approach*). yang mempertimbangkan dampak lingkungan sejak tahap ekstraksi bahan baku. proses produksi, penggunaan, hingga tahap akhir masa pakai material (Allwood *et al*., 2012; European Commission, 2020).

Selain aspek keberlanjutan. material teknik masa depan juga diarahkan pada pengembangan material multifungsi yang mampu menggabungkan beberapa sifat unggul dalam satu sistem material. Material tidak lagi hanya berfungsi sebagai elemen struktural, tetapi juga bisa berperan sebagai sensor, aktuator, atau penyimpan energi. Dalam beberapa dekade terakhir. perkembangan ini dimungkinkan melalui rekayasa mikrostruktur dan nanostruktur. akibatnya sifat mekanik, termal, elektrik, dan kimia bisa diintegrasikan secara simultan. Dengan kata lain. batas antara material struktural dan material fungsional menjadi semakin kabur. dan desain material modern menekankan optimalisasi berbagai sifat dalam satu platform material (Rogers *et al*., 2010; O'Brien, 2011). Kemajuan teknologi manufaktur dan komputasi turut serta dalam mendorong percepatan inovasi

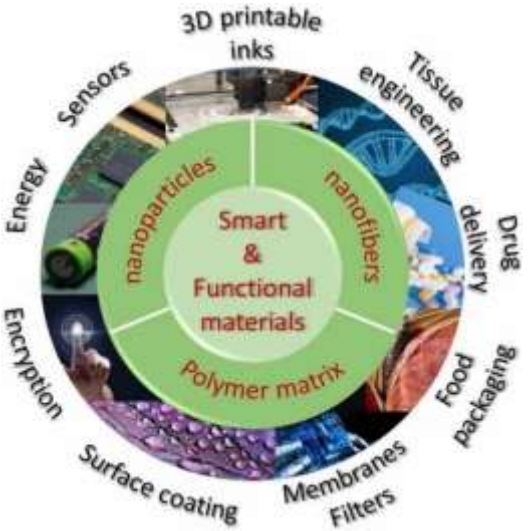
material teknik. Teknologi manufaktur maju memungkinkan pengendalian mikrostruktur secara presisi. sedangkan pendekatan komputasional dan kecerdasan buatan membuka peluang untuk memprediksi sifat material dan merancang material baru secara lebih efisien. Integrasi antara eksperimen. simulasi. dan karakterisasi material menjadi kunci dalam mempercepat penemuan material inovatif yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi teknik modern (Butler *et al*., 2018; Ramakrishna *et al*., 2017). Dalam praktik teknik mesin, konsep ini cukup penting untuk dipahami.

Berdasarkan perkembangan tersebut. arah masa depan material teknik akan sangat dipengaruhi oleh integrasi multidisiplin antara ilmu material. teknologi manufaktur, pendekatan komputasional, serta prinsip keberlanjutan. Pembahasan ini nantinya akan menjadi sintesis dari konsep-konsep dasar mengenai struktur. sifat. proses, dan aplikasi material yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, akibatnya memberikan gambaran komprehensif mengenai peran strategis material teknik dalam mendukung kemajuan teknologi rekayasa di masa depan. Mahasiswa teknik biasanya menemui konsep ini ketika mempelajari ilmu material.

13.1 Perkembangan Material Teknik Masa Depan

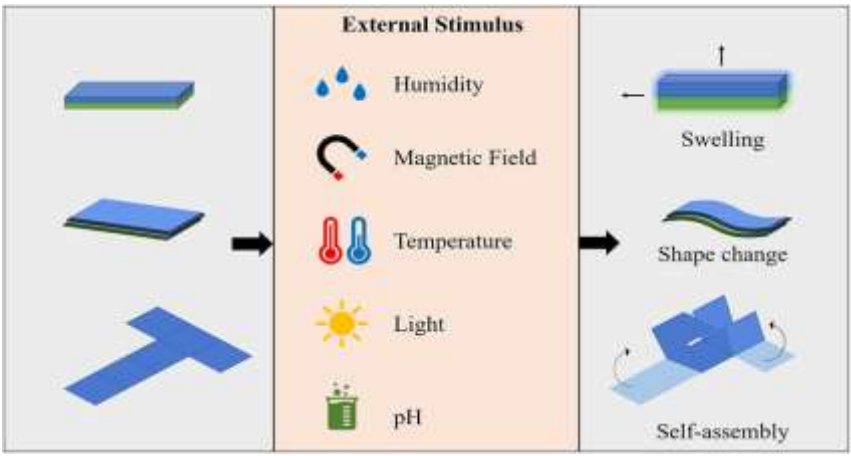
Perkembangan material teknik di masa depan sangat dipengaruhi oleh meningkatnya kompleksitas kebutuhan rekayasa modern yang menuntut material dengan performa tinggi sekaligus efisiensi sumber daya. Klasifikasi material teknik seperti logam, keramik, polimer, dan komposit memberikan dasar pemahaman mengenai karakteristik masing-masing kelompok material. Namun, arah pengembangan material saat ini tidak lagi hanya berfokus pada jenis material, melainkan pada upaya peningkatan performa melalui rekayasa struktur dan komposisi material

agar sesuai dengan kebutuhan aplikasi teknik yang semakin spesifik (Ashby *et al*., 2019; Callister & Rethwisch, 2020).



Gambar 13. 1 Perkembangan Material Teknik Masa Depan Sesuai Fungsinya

Kebutuhan teknologi yang terus berkembang mendorong lahirnya material generasi baru dengan karakteristik yang lebih unggul dibandingkan material konvensional. Pengembangan material modern dilakukan melalui pengendalian struktur mikro dan nano. akibatnya sifat mekanik, termal, elektrik, dan kimia bisa dioptimalkan secara terarah. Pendekatan ini menegaskan bahwa inovasi material tidak hanya bergantung pada penemuan material baru. tetapi juga pada modifikasi material yang sudah ada untuk memperoleh kombinasi sifat yang lebih sesuai dengan tuntutan rekayasa (Shackelford, 2015). Dalam praktik teknik mesin, konsep ini cukup penting untuk dipahami.



Secara umum, arah perkembangan material teknik masa depan dapat dikelompokkan ke dalam beberapa tren utama, yaitu pengembangan material ringan berkekuatan tinggi, material multifungsi, serta material berbasis nanoteknologi. Ketiga tren tersebut saling berkaitan dan berlandaskan pada konsep hubungan antara struktur, sifat, proses, dan kinerja material sebagai kerangka utama dalam rekayasa material modern.

Material ringan berkekuatan tinggi dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi energi dan performa sistem mekanik. sedangkan material multifungsi dirancang untuk mengintegrasikan beberapa fungsi dalam satu sistem material. Sementara itu. material berbasis nanoteknologi memungkinkan peningkatan sifat material secara signifikan melalui rekayasa pada skala nano (Rogers *et al*., 2010; O'Brien, 2011). Pemahaman mengenai tren perkembangan ini memberikan gambaran komprehensif tentang arah inovasi material teknik di masa depan. Uraian pada bagian berikutnya akan menjelaskan masing-masing tren tersebut secara lebih rinci. disertai kaitannya dengan karakteristik material teknik yang umum digunakan dalam bidang rekayasa. akibatnya pembaca memperoleh pemahaman yang

utuh mengenai transformasi material dari bentuk konvensional menuju material rekayasa yang lebih canggih dan berkelanjutan.

1.3.2 Material Ringan Berkekuatan Tinggi

Salah satu arah utama perkembangan material teknik adalah pengembangan material dengan karakteristik rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang tinggi. Kebutuhan ini muncul dari tuntutan peningkatan efisiensi energi. pengurangan konsumsi bahan bakar, serta peningkatan performa sistem mekanik tanpa menambah beban struktur. Dalam berbagai aplikasi rekayasa. khususnya pada bidang otomotif. dirgantara, dan peralatan mekanik berkecepatan tinggi, penggunaan material yang ringan namun tetap kuat menjadi faktor kunci dalam meningkatkan kinerja sekaligus menekan biaya operasional (Ashby *et al*., 2019; Callister & Rethwisch, 2020).

Upaya memperoleh kombinasi sifat ringan dan kuat tidak hanya dilakukan melalui pemilihan jenis material. tetapi juga melalui rekayasa komposisi, mikrostruktur, serta proses manufaktur yang tepat. Pengendalian ukuran butir. pembentukan fasa penguat, dan teknik pengolahan lanjutan memungkinkan material memiliki kekuatan tinggi tanpa meningkatkan massa jenis secara signifikan. Pendekatan ini menjadi landasan dalam pengembangan berbagai material struktural modern yang sering dimanfaatkan pada komponen teknik yang membutuhkan efisiensi struktur dan ketahanan mekanik yang optimal (Shackelford. 2015). Beberapa contoh dari material yang mempunyai kekuatan tinggi diantaranya;

- Paduan logam modern (Al, Ti, Mg alloys)

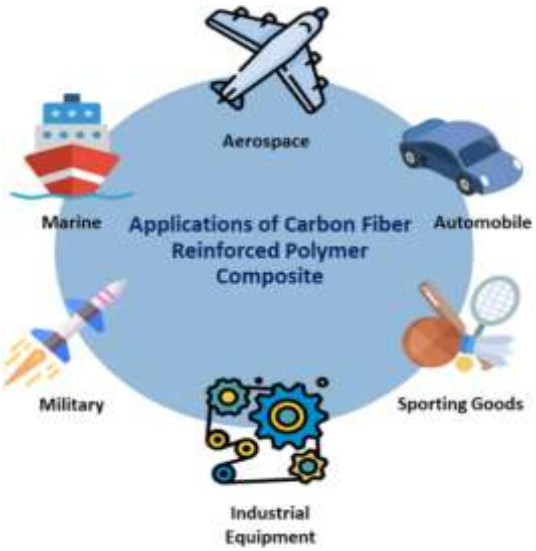
  Paduan logam modern bisa dipahami sebagai material yang dirancang dengan menambahkan unsur paduan tertentu untuk memperoleh kombinasi sifat mekanik yang lebih unggul dibandingkan logam murni. Melalui rekayasa komposisi dan mikrostruktur. paduan

logam bisa memiliki kekuatan tinggi, ketahanan korosi yang baik, serta stabilitas termal yang sesuai untuk berbagai aplikasi teknik. Karena itu, paduan logam menjadi pilihan utama dalam pengembangan material struktural yang menuntut rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi.

- Komposit serat karbon dan aplikasinya

  Komposit serat karbon bisa dipahami sebagai salah satu material rekayasa maju yang dikembangkan untuk memperoleh kombinasi sifat ringan. kuat, dan kaku secara simultan. Material ini tersusun dari serat karbon sebagai penguat dan matriks polimer sebagai pengikat. akibatnya mampu memberikan rasio kekuatan terhadap berat yang sangat tinggi dibandingkan material logam konvensional. Keunggulan tersebut menjadikan komposit serat karbon banyak dimanfaatkan pada berbagai aplikasi teknik yang memerlukan efisiensi struktur dan performa mekanik yang optimal. Penjelasan seperti ini biasanya digunakan dalam buku ajar ilmu material.

Sebagaimana ditunjukkan pada gambar. pemanfaatan komposit serat karbon meliputi berbagai sektor strategis. antara lain industri dirgantara (*aerospace*) untuk struktur pesawat yang ringan dan kuat, otomotif untuk mengurangi bobot kendaraan, serta industri maritim yang membutuhkan material tahan korosi. Di sisi lain. material ini juga digunakan pada bidang militer untuk komponen berperforma tinggi. peralatan olahraga (*sporting goods*) yang memerlukan kekakuan dan respons mekanik baik, serta peralatan industri (*industrial equipment*) yang menuntut ketahanan dan efisiensi struktur. Keragaman aplikasi tersebut menunjukkan bahwa komposit serat karbon memiliki peran penting dalam pengembangan material teknik modern yang berorientasi pada efisiensi. kekuatan, dan keandalan struktur.



Gambar 13. 2 Aplikasi Komposit Serat Karbon dalam Berbagai

13.3 Material Multifungsi

Dalam beberapa dekade terakhir. perkembangan material teknik modern mengarah pada pengembangan material multifungsi yang mampu menjalankan lebih dari satu peran dalam suatu sistem rekayasa. Material ini tidak hanya berfungsi sebagai elemen struktural yang menahan beban, tetapi juga memiliki fungsi tambahan tertentu sesuai kebutuhan aplikasi teknik. Dengan kata lain. konsep material multifungsi menekankan pada perancangan material yang mampu meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem secara keseluruhan (Ashby *et al*.. 2019; O'Brien, 2011). Salah satu karakteristik utama material multifungsi adalah kemampuannya berperan sebagai material struktural sekaligus fungsional. Artinya. material tidak hanya memberikan kekuatan mekanik, tetapi juga bisa berfungsi sebagai penghantar panas, konduktor listrik, sensor, atau

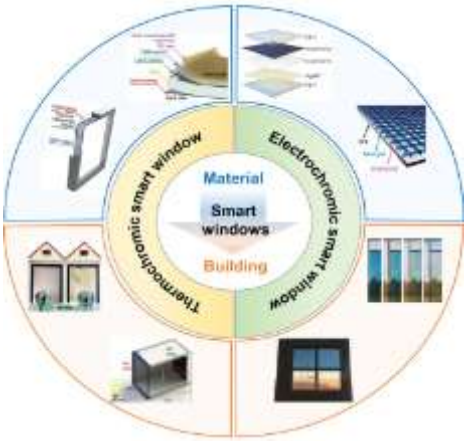
bahkan aktuator dalam suatu sistem. Pendekatan ini memungkinkan pengurangan jumlah komponen serta penyederhanaan desain struktur teknik.

Di sisi lain material multifungsi umumnya dirancang melalui integrasi berbagai sifat fisik, seperti sifat mekanik, termal, dan elektrik, dalam satu sistem material. Integrasi sifat-sifat tersebut dicapai melalui rekayasa komposisi. mikrostruktur, maupun penggunaan material komposit dan material cerdas, akibatnya satu material bisa memenuhi beberapa tuntutan kinerja secara bersamaan. Pendekatan ini menjadi sangat penting dalam pengembangan komponen teknik modern yang menuntut efisiensi. keandalan, serta performa yang tinggi dalam kondisi operasi yang kompleks. Untuk memahami konsep material multifungsi secara lebih jelas. perlu ditinjau dua aspek penting yang menjadi ciri utamanya. yaitu perannya sebagai material struktural sekaligus fungsional serta integrasi berbagai sifat fisik, seperti mekanik, termal, dan elektrik, dalam satu sistem material.

- Material struktural sekaligus fungsional

  Material struktural sekaligus fungsional bisa dipahami sebagai material yang tidak hanya berperan sebagai penopang beban mekanik. tetapi juga memiliki fungsi tambahan tertentu sesuai kebutuhan sistem rekayasa. Dengan konsep ini, satu material bisa berperan ganda, misalnya sebagai elemen struktur sekaligus penghantar panas, konduktor listrik, atau sensor atau dapat juga pengurangan jumlah komponen. Penyederhanaan desain, serta peningkatan efisiensi dan kinerja sistem secara keseluruhan dalam berbagai aplikasi teknik modern.

- Integrasi sifat mekanik, termal, dan elektrik



Gambar 13. 3 Integrasi Sifat Material

Integrasi sifat mekanik, termal, dan elektrik merupakan salah satu karakteristik utama material multifungsi yang dirancang untuk memenuhi berbagai tuntutan kinerja dalam satu sistem material. Melalui rekayasa komposisi dan mikrostruktur, suatu material dapat memiliki kekuatan mekanik yang baik, kemampuan menghantarkan atau mengisolasi panas, serta sifat konduktivitas atau respons elektrik secara bersamaan. Pendekatan ini memungkinkan material tidak hanya berfungsi sebagai penopang struktur, tetapi juga berperan dalam pengendalian panas dan sinyal listrik pada komponen teknik modern.

13.4 Material Berbasis Nanoteknologi

Material berbasis nanoteknologi merupakan salah satu perkembangan penting dalam ilmu material yang memanfaatkan rekayasa struktur pada skala nanometer (sekitar 1–100 nm). Pada skala ini, material dapat menunjukkan sifat fisik, kimia, dan mekanik yang berbeda dibandingkan material dalam ukuran makro atau konvensional. Perubahan sifat tersebut terjadi karena meningkatnya luas permukaan relatif serta munculnya efek ukuran (*size effect*) yang mempengaruhi perilaku atom dan interaksi antar partikel penyusun material.



Gambar 13. 4 Material Nanoteknologi

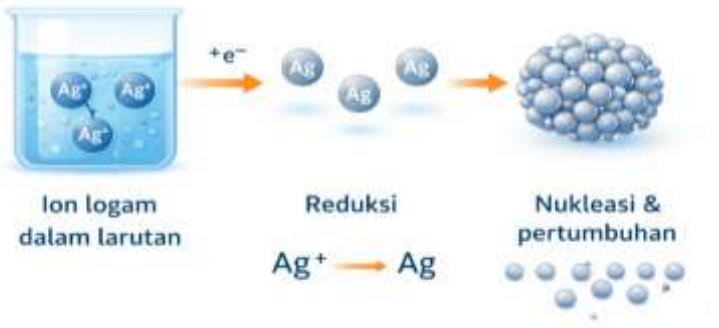
Pengendalian struktur material pada skala nano memungkinkan peningkatan berbagai sifat material. seperti kekuatan mekanik, konduktivitas listrik, konduktivitas termal, serta ketahanan terhadap korosi dan keausan. Karena itu. material berbasis nanoteknologi banyak dikembangkan untuk berbagai aplikasi teknik modern. termasuk material komposit maju, pelapis fungsional, sensor, serta perangkat energi. Pengembangan material nano umumnya dilakukan melalui rekayasa struktur nano serta pemahaman hubungan antara cacat kristal dan mikrostruktur material yang berperan penting dalam menentukan sifat akhir material tersebut (Callister & Rethwisch. 2020; Ashby *et al*, 2019).

- Rekayasa struktur nano

  Rekayasa struktur nano bisa dipahami sebagai proses pengendalian struktur material pada skala nanometer (sekitar 1–100 nm) untuk memperoleh sifat material yang lebih unggul dibandingkan material konvensional. Pada skala ini. pengaturan ukuran partikel, distribusi atom, serta interaksi antar partikel bisa mempengaruhi sifat mekanik, listrik, termal, maupun kimia suatu material. Dengan memanipulasi struktur material pada tingkat nano. para peneliti bisa meningkatkan kekuatan material, memperbaiki konduktivitas listrik, serta meningkatkan aktivitas unsur/senyawa kimia dari material tersebut.

  Salah satu pendekatan dalam rekayasa struktur nano adalah sintesis nanopartikel melalui berbagai metode kimia maupun fisika. Sebagai contoh. pada proses sintesis nanopartikel logam melalui metode reduksi kimia. ion logam dalam larutan direduksi menjadi atom logam yang kemudian mengalami nukleasi dan pertumbuhan partikel nano. Secara sederhana, reaksi reduksi tersebut bisa dituliskan sebagai berikut: Jika dipahami dari sudut pandang pembelajaran teknik mesin, konsep ini cukup penting.

$$Ag+ + e- \longrightarrow Ag$$



Gambar 13. 5 Reduksi ion Ag+

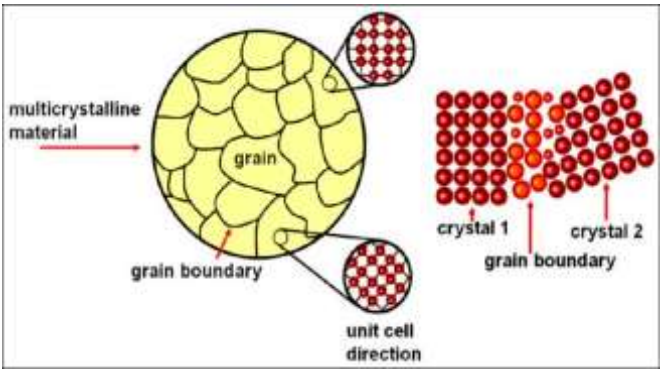
Dalam proses ini, ion perak (Ag^+) akan direduksi menjadi atom perak (Ag) yang kemudian beragregasi membentuk nanopartikel. Ukuran dan distribusi nanopartikel yang terbentuk bisa dikontrol melalui parameter proses seperti konsentrasi prekursor. suhu, pH larutan, serta penggunaan agen penstabil (*stabilizer*).

- Hubungan dengan cacat kristal dan mikrostruktur

  Hubungan antara cacat kristal dan mikrostruktur dalam material sangat erat. karena cacat kristal bisa dipahami sebagai salah satu komponen penting yang membentuk karakteristik fisik suatu mikrostruktur. Mikrostruktur material mencakup berbagai fitur seperti batas butir (*grain boundaries*). yang pada dasarnya bisa dipahami sebagai kumpulan cacat kristal berupa cacat bidang. Tanpa keberadaan cacat kristal tersebut. suatu material akan berbentuk kristal tunggal yang sempurna. bukan struktur polikristalin yang umumnya ditemukan pada sebagian besar material teknik (Callister & Rethwisch, 2020).

Disamping itu, keberadaan cacat kristal seperti cacat titik maupun cacat garis berupa dislokasi juga berperan penting dalam menentukan kekuatan material. Dalam struktur kristal, dislokasi bisa bergerak ketika material mengalami beban mekanik. Meski demikian. jika terbisa hambatan seperti atom pengotor. batas butir, atau presipitat dalam mikrostruktur, pergerakan dislokasi akan terhambat akibatnya meningkatkan kekuatan dan kekerasan material (Ashby *et al*., 2019).

Keberadaan cacat kristal juga mempengaruhi sifat fisis material. Mikrostruktur yang mengandung banyak cacat kristal umumnya menunjukkan konduktivitas listrik yang lebih rendah karena pergerakan elektron menjadi terhambat oleh ketidakteraturan struktur atom. Sebaliknya. jumlah cacat kristal yang lebih tinggi seringkali meningkatkan kekuatan mekanik material. misalnya pada proses pengerasan kerja (*work hardening*) yang terjadi selama deformasi plastis (Callister & Rethwisch, 2020).



Gambar 13. 6 Cacat Kristal

Gambar 13.6 menunjukkan ilustrasi pembentukan cacat kristal dalam material polikristalin; Penjelasan seperti ini biasanya digunakan dalam buku ajar ilmu material.

1. *Multicrystalline Material* (Material Polikristalin)

Dalam gambar sebelah kiri, lingkaran besar menunjukkan mikrostruktur sebuah logam atau keramik. Kebanyakan material padat di dunia nyata tidak terdiri dari satu kristal tunggal yang sempurna. melainkan kumpulan dari jutaan kristal kecil yang disebut Grain (butiran).

2. *Grains & Unit Cell Direction* (Butiran & Orientasi)

   Jika diperhatikan lingkaran kecil yang diperbesar bisa dipahami sebagai:

   - Setiap Grain memiliki "Unit Cell Direction" (arah kisi-kisi atom) yang berbeda.
   - Di dalam satu butiran, atom-atom tersusun rapi searah. Meski demikian, butiran di sebelahnya memiliki arah susunan yang miring atau berbeda. Inilah yang disebut perbedaan orientasi kristalografis.

3. *Grain Boundary* (Batas Butir) sebagai "Cacat" yang bisa dipahami sebagai point penting dalam cacat material dimana Contoh sederhana dari konsep ini dapat ditemukan pada berbagai komponen mesin.

   - Garis-garis kuning yang memisahkan antar butiran disebut Grain Boundary (Batas Butir). Contoh sederhana dari konsep ini dapat ditemukan pada berbagai komponen mesin.
   - Dalam ilmu material, batas butir ini dikategorikan sebagai Cacat Bidang (planar defect).
   - Perhatikan gambar di sebelah kanan (Crystal 1 vs Crystal 2): Di area pertemuan (tengah), atom-atom tidak bisa tersusun rapi karena perbedaan arah. Area yang "berantakan" atau tidak teratur inilah yang disebut batas butir.

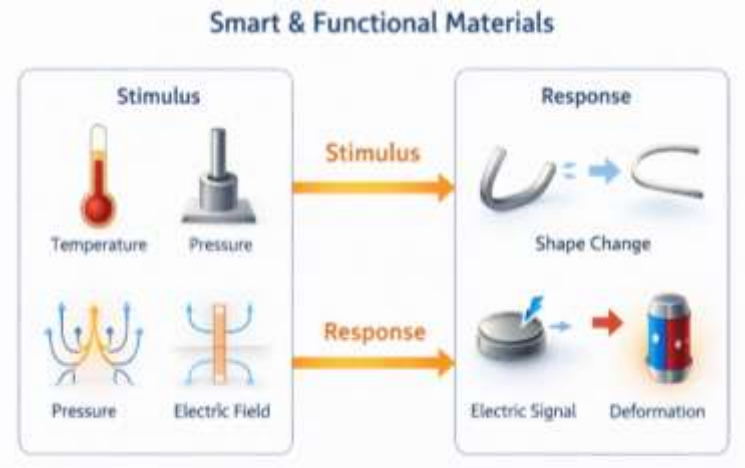
4. Hubungan dengan Sifat Material

   Hubungan ini penting untuk diketahui karena; Jika dipahami dari sudut pandang pembelajaran teknik mesin, konsep ini cukup penting.

- Kekuatan: Batas butir berfungsi sebagai penghalang bagi pergerakan dislokasi (cacat garis). Semakin banyak batas butir (butiran semakin kecil/halus), material biasanya akan semakin kuat dan keras. Fenomena ini dikenal sebagai Grain Size Strengthening.
- Korosi: Karena atom di batas butir tidak tersusun rapi (memiliki energi lebih tinggi). area ini biasanya lebih mudah terserang korosi dibandingkan bagian dalam butiran.

13.5 Material Cerdas dan Adaptif (*Smart & Functional Materials*)

Material cerdas dan adaptif bisa dipahami sebagai kelompok material dengan karakteristik kemampuan untuk merespons perubahan lingkungan di sekitarnya secara otomatis. Berbeda dengan material konvensional yang bersifat pasif. material jenis ini mampu mengalami perubahan sifat atau bentuk ketika menerima rangsangan tertentu. seperti perubahan suhu, tekanan, medan listrik, medan magnet, maupun cahaya. Kemampuan tersebut menjadikan material cerdas banyak dikembangkan untuk berbagai aplikasi teknik modern yang memerlukan sistem yang responsif dan adaptif terhadap kondisi operasional.



Gambar 13. 7 *Smart & Functional Materials*

Rangsangan (stimulus) seperti perubahan suhu. tekanan. dan medan listrik tentunya bisa memicu respons tertentu pada material, misalnya perubahan bentuk (*shape change*), deformasi, atau munculnya sinyal listrik. Kemampuan material untuk merespons stimulus inilah yang menjadikan material cerdas banyak digunakan dalam sistem sensor. aktuator. serta berbagai aplikasi rekayasa modern yang membutuhkan sistem yang responsif dan adaptif terhadap kondisi lingkungan serta komponen teknik yang membutuhkan tingkat presisi dan efisiensi yang tinggi. Dalam beberapa dekade terakhir. perkembangan teknologi material cerdas juga membuka peluang inovasi dalam berbagai bidang rekayasa. mulai dari industri otomotif, dirgantara, hingga perangkat energi dan sistem kontrol modern (Callister & Rethwisch, 2020; Ashby *et al*., 2019).



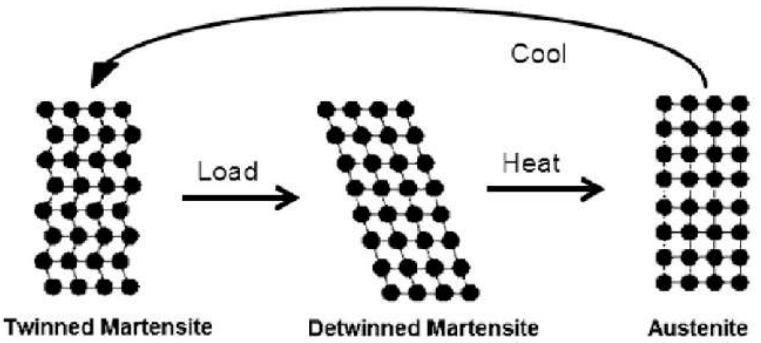
Gambar 13. 8 Aplikasi dari Material Cerdas dan Adaptif

Seperti yang sudah dijelaskan bahwa material cerdas memiliki kemampuan untuk merespons perubahan kondisi lingkungan. seperti tekanan, suhu, atau sinyal listrik, akibatnya bisa digunakan pada sistem yang membutuhkan respons otomatis dan presisi tinggi. Dari gambar 8 beberapa contoh penerapan material cerdas. seperti pada sensor kesehatan. alat ini bisa digunakan untuk memantau kondisi tubuh secara real-time, struktur pintar (*smart structures*) yang mampu mendeteksi perubahan atau kerusakan pada infrastruktur, perangkat elektronik responsif yang mampu menyesuaikan kinerjanya terhadap perubahan lingkungan. Aplikasi lain dari material cerdas pada bidang robotika dan otomotif yang memanfaatkan material adaptif untuk meningkatkan efisiensi dan performa sistem. Inovasi penggunaan material cerdas ini menunjukkan peran penting ilmu material dalam mendukung perkembangan teknologi modern yang lebih cerdas. responsif, dan efisien.

Setelah memahami konsep dasar material cerdas. pembahasan selanjutnya bisa difokuskan pada beberapa jenis material dengan karakteristik kemampuan responsif terhadap berbagai rangsangan eksternal. Material-material tersebut mampu merespons perubahan lingkungan seperti suhu. tekanan, medan listrik, maupun medan magnet, akibatnya bisa dimanfaatkan dalam berbagai sistem rekayasa modern. Beberapa jenis material cerdas yang banyak dikembangkan dan digunakan dalam aplikasi teknik antara lain shape memory alloys (SMA). material piezoelektrik, dan material magnetostriktif.

1. Shape Memory Alloys (SMA)

Shape Memory Alloys (SMA) bisa dipahami sebagai paduan logam dengan karakteristik kemampuan unik untuk kembali ke bentuk semula setelah mengalami deformasi ketika dipanaskan hingga suhu tertentu. Fenomena ini dikenal sebagai shape memory effect, yang terjadi akibat perubahan struktur kristal material antara fase martensit dan austenit. Ketika berada pada suhu rendah, material bisa dideformasi dengan mudah. Meski demikian setelah dipanaskan, struktur kristalnya kembali ke fase awal akibatnya bentuk material kembali seperti semula. Kemampuan tersebut menjadikan SMA banyak digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi modern. seperti aktuator, perangkat medis (misalnya stent pembuluh darah), serta komponen pada sistem robotika dan dirgantara. Material yang paling umum digunakan sebagai SMA adalah paduan Nikel–Titanium (NiTi) yang dikenal memiliki sifat elastisitas tinggi serta ketahanan terhadap korosi.

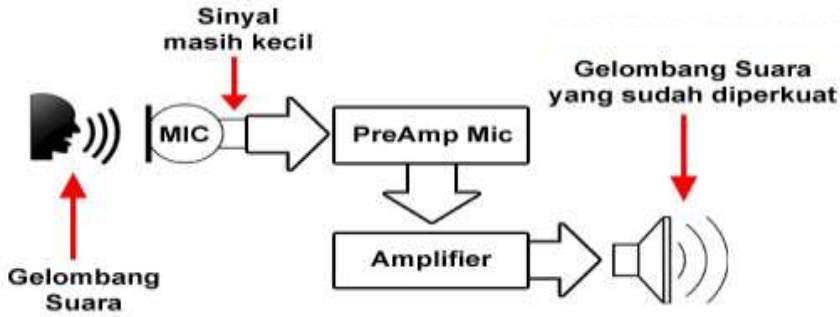


Gambar 13. 9 *Shape Memory Alloys* (SMA)

Dalam gambar 13.9 material yang mengalami deformasi pada suhu rendah bisa kembali ke bentuk awal setelah dipanaskan.

2. Material *Piezoelektrik*

Material piezoelektrik bisa dipahami sebagai material yang mampu menghasilkan tegangan listrik ketika mengalami tekanan atau deformasi mekanik. Fenomena ini dikenal sebagai efek piezoelektrik. yang terjadi karena perubahan distribusi muatan listrik dalam struktur kristal material akibat adanya gaya mekanik. Sebaliknya, ketika diberi tegangan listrik, material piezoelektrik juga bisa mengalami deformasi mekanik. Karena sifat tersebut. material piezoelektrik banyak dimanfaatkan dalam berbagai perangkat teknologi seperti sensor tekanan. mikrofon, aktuator presisi, serta sistem pemanen energi (*energy harvesting*).



Gambar 13. 10 Material Piezoelektrik (Mikrofon)

Contoh sederhana dari konsep ini dapat ditemukan pada berbagai komponen mesin. Gelombang suara dari pembicara ditangkap oleh mikrofon (MIC) dan diubah menjadi sinyal listrik yang masih sangat kecil. Sinyal tersebut kemudian diperkuat oleh rangkaian preamplifier (PreAmp Mic) agar amplitudonya meningkat. Selanjutnya sinyal diperkuat kembali oleh amplifier akibatnya cukup kuat untuk menggerakkan speaker. Speaker kemudian mengubah sinyal listrik tersebut kembali menjadi gelombang suara yang bisa didengar dengan jelas.

3. Material *Magnetostriktif*

Material magnetostriktif adalah material yang mengalami perubahan dimensi atau bentuk ketika dikenai medan magnet. Perubahan ini terjadi karena adanya perubahan orientasi domain magnetik dalam struktur material ketika medan magnet diterapkan. Fenomena ini dikenal sebagai efek magnetostriksi, yang memungkinkan material mengubah energi magnetik menjadi deformasi mekanik. Material magnetostriktif ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi seperti sensor medan magnet. aktuator presisi, sistem sonar, serta perangkat ultrasonik. Salah satu material

magnetostriktif yang banyak digunakan adalah Terfenol-D. yaitu paduan terbium, dysprosium, dan besi dengan karakteristik respons magnetostriksi yang sangat tinggi.

13.6 Material Berkelanjutan dan Ramah Lingkungan

Dalam beberapa dekade terakhir perkembangan teknologi material pada era modern tidak hanya berfokus pada peningkatan sifat mekanik. ketahanan, dan kinerja material, tetapi juga mulai memperhatikan dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi maupun penggunaannya. Seiring meningkatnya kebutuhan material dalam berbagai sektor industri. perhatian terhadap penggunaan sumber daya alam yang efisien serta pengurangan limbah dan emisi menjadi semakin penting. Karena itu. konsep material berkelanjutan dan ramah lingkungan berkembang sebagai salah satu pendekatan dalam rekayasa material yang bertujuan untuk menciptakan material dengan dampak lingkungan yang lebih rendah tanpa mengurangi performa teknisnya (Callister & Rethwisch. 2020; Ashby *et al*., 2019).

Material berkelanjutan dirancang dengan mempertimbangkan seluruh siklus hidup material. mulai dari proses ekstraksi bahan baku, proses manufaktur, penggunaan, hingga tahap daur ulang atau pembuangan akhir. Pendekatan ini sering dikenal sebagai *life cycle assessment* (LCA), yaitu metode untuk mengevaluasi dampak lingkungan suatu material selama masa penggunaannya. Dengan pendekatan tersebut. para peneliti dan insinyur material berupaya mengembangkan material yang lebih efisien dalam penggunaan energi. menghasilkan emisi yang lebih rendah, serta memiliki kemampuan untuk didaur ulang atau terurai secara alami. Penjelasan ini membantu memahami hubungan antara struktur dan sifat material.

Di sisi lain. pengembangan material ramah lingkungan juga mendorong pemanfaatan bahan baku yang bisa diperbarui serta pemanfaatan kembali material bekas melalui proses daur ulang. Upaya ini bertujuan untuk mengurangi eksploitasi sumber daya alam yang terbatas sekaligus menekan jumlah limbah industri yang dihasilkan. Dengan kata lain. pengembangan material berkelanjutan tidak hanya memberikan manfaat dari sisi lingkungan. tetapi juga berkontribusi terhadap efisiensi penggunaan sumber daya dan keberlanjutan sistem industri di masa depan. Penjelasan seperti ini biasanya digunakan dalam buku ajar ilmu material.

Berdasarkan pendekatan tersebut. pengembangan material berkelanjutan dan ramah lingkungan bisa ditinjau melalui beberapa aspek utama. antara lain penggunaan material berbasis sumber daya terbarukan serta pemanfaatan material daur ulang yang mendukung efisiensi penggunaan sumber daya alam. Contoh sederhana dari konsep ini dapat ditemukan pada berbagai komponen mesin.

13.7 Material Berbasis Sumber Daya Terbarukan

Material berbasis sumber daya terbarukan bisa dipahami sebagai material yang berasal dari bahan alam yang bisa diperbarui secara alami dalam waktu relatif singkat. Contohnya adalah biopolimer, komposit berbasis serat alam, serta biomaterial yang berasal dari limbah pertanian atau hasil samping industri. Penggunaan material jenis ini bisa mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku berbasis minyak bumi serta mengurangi dampak lingkungan dari proses produksi material. Dalam praktik teknik mesin, konsep ini cukup penting untuk dipahami. Jika dipahami dari sudut pandang pembelajaran teknik mesin, konsep ini cukup penting.

Salah satu contoh reaksi kimia yang sering digunakan dalam pengembangan biomaterial adalah pembentukan biopolimer melalui proses polimerisasi. misalnya pada pembentukan polilaktat (PLA):

$$nC_3H_6O_3 \longrightarrow (C_3H_4O_2)n + nH_2O$$

Reaksi tersebut menunjukkan proses polimerisasi asam laktat yang menghasilkan polimer biodegradable yang banyak digunakan pada kemasan ramah lingkungan serta aplikasi biomaterial. Penjelasan ini membantu memahami hubungan antara struktur dan sifat material.

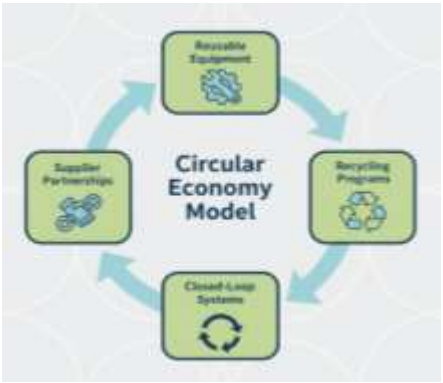


Gambar 13. 11 Material terbarukan

13.8 Material Daur Ulang dan Efisiensi Sumber Daya

Selain penggunaan bahan baku terbarukan, pendekatan lain dalam pengembangan material berkelanjutan adalah pemanfaatan material daur ulang. Proses daur ulang memungkinkan material yang telah digunakan bisa diproses kembali menjadi bahan baku baru akibatnya mengurangi kebutuhan eksploitasi sumber daya alam serta mengurangi

limbah industri. Penjelasan seperti ini biasanya digunakan dalam buku ajar ilmu material.



Gambar 13. 12 Daur Ulang Material

Siklus daur ulang material dalam sistem ekonomi sirkular bisa dipahami sebagai proses daur ulang dimana material yang telah digunakan bisa diproses kembali menjadi bahan baku baru untuk mengurangi limbah dan penggunaan sumber daya alam.

13.8 Perkembangan Proses Manufaktur untuk Material Masa Depan

Dalam beberapa dekade terakhir. perkembangan teknologi material tidak bisa dipisahkan dari kemajuan proses manufaktur yang sering dimanfaatkan untuk memproduksi dan memodifikasi material tersebut. Proses manufaktur modern tidak hanya bertujuan membentuk material menjadi produk tertentu. tetapi juga berperan penting dalam mengontrol struktur mikro, sifat mekanik, serta performa material secara keseluruhan. Dengan kemajuan teknologi rekayasa material. berbagai metode manufaktur baru dikembangkan untuk menghasilkan

material dengan sifat yang lebih unggul. presisi tinggi, serta efisiensi penggunaan sumber daya yang lebih baik (Callister & Rethwisch, 2020; Ashby *et al*., 2019).

Dalam beberapa dekade terakhir. proses manufaktur mengalami perkembangan yang signifikan seiring meningkatnya kebutuhan akan material yang lebih ringan, kuat, dan multifungsi. Teknologi manufaktur modern memungkinkan pengendalian struktur material pada berbagai skala, mulai dari skala makro hingga mikro dan nano. Melalui pengendalian proses seperti suhu. tekanan. laju pendinginan, serta teknik deformasi, para insinyur bisa memodifikasi mikrostruktur material akibatnya menghasilkan sifat mekanik dan fungsional yang diinginkan. Dalam praktik teknik mesin, konsep ini cukup penting untuk dipahami. Jika dipahami dari sudut pandang pembelajaran teknik mesin, konsep ini cukup penting.

Salah satu perkembangan penting dalam proses manufaktur material adalah munculnya teknologi additive manufacturing atau yang lebih dikenal sebagai 3D printing. Teknologi ini memungkinkan pembuatan komponen secara bertahap dengan menambahkan material lapis demi lapis berdasarkan model digital. Keunggulan utama dari metode ini adalah kemampuannya menghasilkan geometri yang kompleks. mengurangi limbah material, serta mempercepat proses desain dan produksi komponen teknik. Teknologi ini banyak digunakan dalam industri dirgantara. otomotif, dan biomaterial untuk menghasilkan komponen dengan desain yang sulit dicapai melalui metode manufaktur konvensional. Penjelasan ini membantu memahami hubungan antara struktur dan sifat material. Mahasiswa biasanya mulai memahami konsep ini ketika mempelajari struktur material.

Di sisi lain. perkembangan proses manufaktur juga mencakup teknik advanced processing seperti powder metallurgy, sintering, serta deposisi lapisan tipis (thin film deposition). Metode-metode tersebut memungkinkan produksi material dengan kontrol komposisi dan struktur

mikro yang lebih presisi. Sebagai contoh. pada proses sintering dalam metalurgi serbuk. partikel logam dipanaskan hingga mendekati titik lebur akibatnya terjadi difusi atom yang menyebabkan partikel-partikel tersebut saling terikat dan membentuk struktur padat. Secara sederhana, proses difusi tersebut bisa digambarkan sebagai:

$$M_{particle} + heat \rightarrow M_{solid}$$

Proses ini menghasilkan material dengan struktur mikro yang lebih homogen dan sifat mekanik yang bisa dikontrol sesuai kebutuhan aplikasi teknik. Mahasiswa biasanya mulai memahami konsep ini ketika mempelajari struktur material.

Peningkatan kualitas material. proses manufaktur modern juga mulai diarahkan pada prinsip keberlanjutan dengan mengurangi konsumsi energi. limbah produksi, serta emisi yang dihasilkan selama proses manufaktur. Pendekatan ini dikenal sebagai sustainable manufacturing, yang bertujuan untuk mengembangkan sistem produksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan kata lain. perkembangan proses manufaktur menjadi salah satu faktor kunci dalam mendukung pengembangan material masa depan yang tidak hanya memiliki performa tinggi. tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan dalam industri modern. Penjelasan ini membantu memahami hubungan antara struktur dan sifat material.



Gambar 13. 13 Perkembangan Proses Manufaktur Material Masa Depan

13.9 Perkembangan Material terhadap Dunia Teknik Mesin

Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan ilmu material memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap berbagai bidang rekayasa, termasuk teknik mesin. Inovasi dalam pengembangan material modern. seperti material ringan berkekuatan tinggi. material cerdas, serta material berkelanjutan, telah membuka peluang baru dalam perancangan dan pengoperasian sistem mekanik yang lebih efisien dan andal. Kemajuan ini memungkinkan para insinyur mesin untuk merancang komponen dengan kinerja yang lebih optimal. masa pakai yang lebih panjang, serta konsumsi energi yang lebih rendah. Di sisi lain. perkembangan teknologi material juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi sistem mekanik serta mendukung pengembangan teknologi manufaktur yang lebih maju (Callister & Rethwisch. 2020; Ashby *et al*., 2019).

Perkembangan material juga mendorong munculnya pendekatan baru dalam proses desain dan produksi mesin. Penggunaan material modern memungkinkan pengurangan massa komponen tanpa mengurangi kekuatan struktural. akibatnya berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi energi pada berbagai sistem mekanik. Dalam beberapa tahun terakhir. penelitian di bidang material juga semakin menekankan pada pengembangan material yang ramah lingkungan serta proses manufaktur yang lebih berkelanjutan untuk mengurangi dampak lingkungan dari aktivitas industri (Widodo & Nugroho. 2020; Handayani & Prasetyo, 2021).



Gambar 13. 14 Material Ramah Limgkungan

Pemahaman mengenai karakteristik dan potensi material modern menjadi sangat penting bagi para insinyur mesin dalam merancang sistem mekanik yang inovatif dan berkelanjutan. Dalam beberapa dekade terakhir. perkembangan material tidak hanya mempengaruhi tahap perancangan komponen mesin. tetapi juga mempengaruhi proses manufaktur, efisiensi energi, serta keberlanjutan sistem produksi di masa depan. Hal ini juga sejalan dengan

berbagai penelitian di Indonesia yang menekankan pentingnya pemanfaatan material maju untuk mendukung perkembangan industri manufaktur nasional (Rahman & Santoso. 2021).

Secara umum bisa dilihat bahwa. implikasi perkembangan material terhadap dunia teknik mesin bisa dilihat dari beberapa aspek utama. yaitu pemilihan material dalam desain mesin modern, penggunaan material untuk meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan sistem produksi, serta peran insinyur mesin dalam mendorong inovasi material teknik. Mahasiswa biasanya mulai memahami konsep ini ketika mempelajari struktur material.

13.10 Pemilihan Material dalam Desain Mesin Modern

Pemilihan material bisa dipahami sebagai salah satu aspek penting dalam proses perancangan mesin modern. Material yang sering dimanfaatkan harus mampu memenuhi berbagai persyaratan teknis seperti kekuatan mekanik. ketahanan terhadap keausan, ketahanan korosi, serta stabilitas pada kondisi operasi tertentu. Dengan berkembangnya teknologi material. para insinyur mesin kini memiliki lebih banyak pilihan material dengan karakteristik yang lebih unggul dibandingkan material konvensional. seperti paduan logam ringan, material komposit, dan material cerdas (Callister & Rethwisch, 2020).



Gambar 13. 15 Material Unggul

Selain mempertimbangkan sifat mekanik. pemilihan material dalam desain mesin modern juga memperhatikan faktor efisiensi energi, biaya produksi, serta keberlanjutan material tersebut. Material dengan massa jenis yang lebih rendah. misalnya paduan aluminium atau material komposit, bisa mengurangi berat komponen mesin akibatnya meningkatkan efisiensi energi pada sistem mekanik. Karena itu. pemahaman mengenai sifat material menjadi sangat penting bagi insinyur mesin dalam merancang komponen yang efisien. andal, dan memiliki umur pakai yang panjang (Ashby *et al*., 2019; Widodo & Nugroho, 2020).

13.11 Material untuk Efisiensi Energi dan Keberlanjutan Sistem Produksi

Pengembangan material modern juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi energi serta mendukung keberlanjutan sistem produksi industri. Material dengan sifat mekanik yang lebih baik. seperti kekuatan tinggi. ketahanan terhadap keausan, serta massa jenis yang lebih rendah,

memungkinkan pembuatan komponen mesin yang lebih ringan namun tetap memiliki kekuatan dan ketahanan yang memadai. Penggunaan material ringan berkekuatan tinggi bisa mengurangi beban kerja sistem mekanik akibatnya energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan komponen menjadi lebih kecil. Hal ini sangat penting dalam berbagai aplikasi teknik mesin. seperti pada kendaraan. mesin industri, dan peralatan produksi, di mana pengurangan massa komponen bisa meningkatkan efisiensi energi serta menurunkan konsumsi bahan bakar atau energi listrik. Dengan kata lain. pemilihan material yang tepat tidak hanya meningkatkan kinerja komponen mesin tetapi juga berkontribusi pada sistem produksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.



Gambar 13. 16 Material Ringan dengan Kekuatan Tinggi

Di sisi lain penggunaan material ramah lingkungan serta material yang bisa didaur ulang menjadi salah satu pendekatan penting dalam mewujudkan sistem produksi yang berkelanjutan. Penggunaan material dengan karakteristik umur pakai lebih lama juga bisa mengurangi kebutuhan penggantian komponen serta mengurangi limbah industri yang dihasilkan selama proses produksi. Penelitian

terbaru menunjukkan bahwa pengembangan material berkelanjutan bisa memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi dampak lingkungan dari sektor industri manufaktur (Handayani & Prasetyo. 2021; Rahman & Santoso, 2021).

Beberapa contoh material dengan karakteristik umur pakai lebih lama dalam aplikasi teknik mesin antara lain: Jika dipahami dari sudut pandang pembelajaran teknik mesin, konsep ini cukup penting.

1. ***Stainless Steel***

   Material ini memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap korosi karena adanya unsur kromium yang membentuk lapisan pelindung pada permukaan material. Karena itu. stainless steel banyak digunakan pada komponen mesin yang bekerja di lingkungan lembab atau korosif seperti pipa, tangki, dan komponen mesin industri. Penjelasan ini membantu memahami hubungan antara struktur dan sifat material.

2. **Keramik Teknik (*Engineering Ceramics*)**

   Material keramik seperti alumina (Al_2O_3) dan silicon carbide (SiC) memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap suhu tinggi dan keausan. Material ini sering digunakan pada komponen mesin yang bekerja pada kondisi ekstrem, seperti bantalan, pelapis komponen mesin, serta komponen pada turbin.

3. **Material Komposit**

   Material komposit, seperti komposit serat karbon, memiliki kekuatan tinggi serta ketahanan terhadap kelelahan material (*fatigue*). Material ini banyak digunakan pada industri otomotif dan dirgantara karena mampu mempertahankan performa dalam jangka waktu yang lebih lama dibandingkan material konvensional. Mahasiswa teknik biasanya menemui konsep ini ketika mempelajari ilmu material. Contoh sederhana dari konsep ini dapat ditemukan pada berbagai komponen mesin.

4. Paduan Super (*Superalloys*)

Paduan berbasis nikel atau kobalt memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap suhu tinggi dan oksidasi. Material ini banyak digunakan pada komponen turbin gas, mesin pesawat, serta komponen mesin yang beroperasi pada suhu tinggi. Mahasiswa teknik biasanya menemui konsep ini ketika mempelajari ilmu material.

Dengan penggunaan material dengan karakteristik umur pakai lebih lama, sistem mesin bisa beroperasi secara lebih stabil dan efisien. Di sisi lain. pengurangan frekuensi penggantian komponen juga bisa mengurangi limbah industri dan mendukung prinsip keberlanjutan dalam sistem produksi modern (Callister & Rethwisch. 2020; Ashby *et al*., 2019).

13.12 Peran Insinyur Mesin dalam Inovasi Material Teknik

Insinyur mesin memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan dan penerapan material teknik pada berbagai sistem rekayasa. Selain memahami prinsip kerja mesin. insinyur mesin juga harus memiliki pengetahuan mengenai karakteristik material agar bisa memilih material yang sesuai dengan kebutuhan desain dan kondisi operasi. Kemampuan dalam memahami hubungan antara struktur, sifat, dan proses material menjadi faktor penting dalam menghasilkan inovasi teknologi yang lebih maju.

Didalam perkembangan teknologi modern. insinyur mesin juga berperan dalam mengintegrasikan material baru ke dalam berbagai aplikasi teknik. seperti material komposit untuk struktur ringan, material cerdas untuk sistem sensor dan aktuator, serta material berkelanjutan untuk mendukung industri ramah lingkungan. Dengan kata lain. kolaborasi antara ilmu material dan teknik mesin menjadi salah satu kunci utama dalam menciptakan inovasi teknologi yang lebih

efisien. berkelanjutan, dan berdaya saing tinggi (Callister & Rethwisch, 2020; Ashby *et al*., 2019).



Gambar 13. 17 Pengembangan Material untuk Teknologi Masa Depan

Pengembangan material yang lebih kuat dan tahan lama tentu akan mendukung disain mesin yang lebih ringan dan efisien. akibatnya bisa meningkatkan efisiensi energi. Inovasi-inovasi seperti inilah yang bisa mendorong terciptanya teknologi masa depan yang lebih canggih dan ramah lingkungan. Mahasiswa biasanya mulai memahami konsep ini ketika mempelajari struktur material.

Secara keseluruhan, perkembangan material teknik menunjukkan peran yang sangat penting dalam mendukung kemajuan teknologi rekayasa modern. Inovasi dalam pengembangan material ringan berkekuatan tinggi. material multifungsi. material berbasis nanoteknologi, serta material berkelanjutan telah membuka berbagai peluang baru dalam meningkatkan kinerja sistem mekanik sekaligus mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan industri. Kemajuan

teknologi manufaktur modern juga semakin memperkuat kemampuan para insinyur untuk merancang dan menghasilkan material dengan karakteristik yang lebih presisi sesuai kebutuhan aplikasi teknik. Karena itu. pemahaman mengenai hubungan antara struktur. sifat, proses, dan kinerja material menjadi sangat penting bagi insinyur mesin dalam menghadapi perkembangan teknologi di masa depan. Melalui integrasi antara ilmu material. teknik mesin. serta perkembangan teknologi modern, diharapkan berbagai inovasi rekayasa bisa terus berkembang untuk menciptakan sistem teknik yang lebih efisien, andal, dan ramah lingkungan.

Dengan kata lain. perkembangan material teknik akan terus menjadi salah satu faktor kunci dalam mendorong terciptanya inovasi teknologi rekayasa yang lebih efisien. cerdas, dan berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

Allwood, J. M., Cullen, J. M., & Milford, R. L. (2012). *Sustainable materials: With both eyes open*. UIT Cambridge.

Ampangallo, B. A., Manga, J., Asmeati, dkk. (2025). *Teknologi material*. Arsy Media.

Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. CRC Press.

Aprilia, M. (2023). *Mengenal Proses Metal Rolling Dalam Pembentukan Logam*. Imajin.id.

Aprillian, H. E. (2017). Kajian sifat mekanik aluminium paduan seri 7075 dengan perlakuan. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 6(2), 6–13.

Ashby, M. F. (2013). *Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Ashby, M. F. (2016). *Materials selection in mechanical design* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

Ashby, M. F., Shercliff, H., & Cebon, D. (2013). *Materials: Engineering, Science, Processing and Design* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

Ashby, M. F., Shercliff, H., & Cebon, D. (2018/2019). *Materials: Engineering, science, processing and design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

ASTM International. *Annual Book of ASTM Standards: Plastics / ASTM International Standards for Polymer Testing*. West Conshohocken: ASTM International.

Azhari, A., Karolina, R., & Ritonga, S. I. (2022). *Karakterisasi Termal Material Menggunakan Differential Scanning Calorimetry (DSC)*. Penerbit NEM.

Baird, D. G., & Collias, D. I. (2014). *Polymer processing: Principles and design* (2nd ed.). Wiley-Interscience.

Barsoum, M. W. (2019). *Fundamentals of Ceramics*. CRC Press.

Beer, F. P., & Johnston Jr., E. R. (2012). *Mechanics of Materials* (6th ed.). McGraw-Hill.

Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2015). *Mechanics of Materials* (7th ed.). McGraw-Hill Education.

Blumm, J. (2025). The laser flash technique: A widespread technology for measurement of the thermal diffusivity of solids and liquids. *Journal of Thermophysical Properties and Thermophysics and Its Applications*.

Brandon, D., & Kaplan, W. D. (2008). *Microstructural Characterization of Materials* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

BRIN. (2021). Aplikasi nanoteknologi di berbagai bidang. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 22(2), 55–63.

Brinson, H. F., & Brinson, L. C. (2015). *Polymer engineering science and viscoelasticity*. Springer.

Brown, R. P. (1988). Plastics materials. *Polymer Testing*, 8(5), 370.

Brown, R. P. (1999). *Handbook of polymer testing*. Rapra Technology Limited.

Budinski, K. G., & Budinski, M. K. (2020). *Engineering materials: Properties and selection* (10th ed.). Pearson.

Budynas, R. G., & Sadegh, A. M. (2020). *Roark's formulas for stress and strain* (9th ed.). McGraw-Hill.

Bukvić, M., dkk. (2025). Production technologies and application of polymer composites in engineering: A review. *Polymers*, 17(16), 218.

Butler, K. T., Davies, D. W., Cartwright, H., Isayev, O., & Walsh, A. (2018). Machine learning for molecular and materials science. *Nature*, 559(7715), 547–555.

Cabeza, L. F., et al. (2014). Embodied energy and embodied carbon of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (1997/2010/2013/2014/2018/2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020/2022). *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach* (6th ed.). Wiley.

Carter, C. B., & Norton, M. G. (2013). *Ceramic materials: Science and engineering* (2nd ed.). Springer.

Chang, R., & Overby, J. (2011). *Kimia Dasar Jilid 1*. Erlangga.

Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering* (3rd ed.). Springer.

Chen, J., & Poon, C. S. (2009). Photocatalytic construction and building materials. *Building and Environment*, 44(9), 1899–1906.

Choudhary, K., DeCost, B., Chen, C., Jain, A., Tavazza, F., Cohn, R., Park, C. W., Choudhary, A., Agrawal, A., Billinge, S. J. L., Holm, E., Ong, S. P., & Wolverton, C. (2021). Recent advances and applications of deep learning methods in materials science. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2110.14820

Cikal, A. (2025). Pengembangan komposit serat alam limbah sabut kelapa untuk aplikasi industri berkelanjutan. *Prosiding SENASTITAN*, 3(1), 1–7.

Composite, A. (2022). *Material Komposit*. Aeroengineering.

Cotton, F. A., & Wilkinson, G. (1988). *Advanced Inorganic Chemistry*. John Wiley & Sons.

Courtney, T. H. (2005). *Mechanical behavior of materials* (2nd ed.). Waveland Press.

Crawford, R. J. (1998). *Plastics engineering* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann / Elsevier.

Cullity, B. D., & Graham, C. D. (2009). *Introduction to Magnetic Materials* (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.

Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-Ray Diffraction* (3rd ed.). Prentice Hall.

Cuppoletti, J. (2011). *Nanocomposites and polymers with analytical methods*. InTechOpen.

DeCost, B., Hattrick-Simpers, J., Trautt, Z., Kusne, A. G., Campo, E., & Green, M. L. (2020). Scientific AI in materials science: A path to a sustainable and scalable paradigm. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2003.08471

Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill.

Dini, S. A., dkk. (2024). Determination of the best materials for development and designing product using a multi-criteria decision-making. *Railway Sciences*, 3(5), 541–557.

Dominguez, B. C., Gröls, J. R., Alkandari, S., Perge, L., Avila, C. S., Ramirez, H. Z., Fontes, M. D. L., Yamada, C., Lazarini, S. C., Silva, J. M., Lustri, W. R., & Barud, S. (2025). Biopolymers and biocomposites: a comprehensive review of feedstocks, functionalities, and advanced manufacturing techniques for sustainable applications. *Biotechnology for Sustainable Materials*, BioMed Central. https://doi.org/10.1186/s44316-025-00029-y

European Commission. (2020). *Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*. European Union.

Fatoni, Z. (2016). Pengaruh perlakuan panas terhadap sifat kekerasan pisau penyayat batang karet. *Desiminasi Teknologi*, 4, 56–63.

Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic Properties of Polymers* (3rd ed.). Wiley.

Freire, de F., Gomes, M. G., & Gomes, M. R. R. (2024). *Handbook of Pipeline Engineering*. Springer International Publishing.

Fried, J. R. (2014). *Polymer science and technology* (3rd ed.). Pearson Education.

Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418.

García, J., et al. (2019). Cemented carbide microstructures: a review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 80, 40–68.

Gardiner, G. (2025). *Self-healing, shape-shifting, smart plastic is stronger than steel*. CompositesWorld / Texas A&M University.

Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2012). *Mechanics of Materials* (8th ed.). Cengage Learning.

Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1997). *Mechanics of Materials*. PWS Publishing.

Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2021). *Additive manufacturing technologies* (3rd ed.). Springer.

Giustino, F., Lee, J. H., Trier, F., Bibes, M., Winter, S. M., Valentí, R., Son, Y.-W., Taillefer, L., Heil, C., Figueroa, A. I., Plaçais, B., Wu, Q., Yazyev, O. V., Bakkers, E. P. A. M., Nygård, J., Forn-Díaz, P., De Franceschi, S., McIver, J. W., Torres, L. E. F. F., ... Roche, S. (2021). The 2021 quantum materials roadmap. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2102.02644

Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (4th ed.). Springer.

González-Velázquez, J. L. (2019). *Mechanical Behavior and Fracture of Engineering Materials*. Springer International Publishing.

Groover, M. P. (2022). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems* (International Adaptation). Wiley.

Hammond, G., & Jones, C. (2008). *Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. University of Bath.

Handayani, S., & Prasetyo, A. (2021). Material maju dan aplikasinya dalam industri manufaktur modern. *Jurnal Metalurgi dan Material Indonesia*, 6(2), 85–94.

Hasanah, U. (2024). Pemanfaatan serat alam sebagai material interior kendaraan ramah lingkungan. *Jurnal Rekayasa Material*, 8(2), 112–120.

Hasibuan, F., et al. (2025). *Material Selection and Material Process*. LovRinz Publishing.

Hatakeyama, T., & Quinn, F. X. (1999). *Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymer Science*. Wiley.

Hibbeler, R. C. (2017). *Mechanics of Materials*. Pearson Education.

Hiemenz, P. C., & Lodge, T. P. (2007). *Polymer chemistry* (2nd ed.). CRC Press.

Hill, M., At, P. M., Laboratories, T. B., Press, A., & London, V. (1998). *Molecules*, 3, 50, 3049.

Hilmy, M. S., & Wicaksono, S. (2020). *Dasar-dasar teknologi material*. UB Press.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Pearson Prentice Hall.

Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An Introduction to Composite Materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Hummel, R. E. (2011). *Electronic Properties of Materials* (4th ed.). Springer.

Hussain, C. M., & Di Sia, P. (2022). *Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices: Applications of Industry 4.0*. Springer International Publishing.

Hyer, M. W. (2009). *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*. DEStech Publications.

International Organization for Standardization. *ISO Standards for Polymer Testing and Characterization*. Geneva: ISO.

ISO 14040. (2006). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*. ISO.

Jacobs, J. A., & Kilduff, T. F. (2005). *Engineering materials technology: Structures, processing, properties and selection* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.

Jain, T., Sunil, B. D. Y., Hasan, M. A., dkk. (2024). Smart materials for sensing and actuation: State-of-the-art and prospects. *E3S Web of Conferences*, 505, 01034.

Jani, M. J., et al. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 56, 1078–1113.

Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials. *Energy and Buildings*, 43(10), 2549–2563.

Jellinek, H. G. (1983). *Degradation and stabilization of polymers*. Elsevier Applied Science.

Jones, R. M. (2018). *Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). CRC Press.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2020). *Manufacturing engineering and technology* (8th ed.). Pearson.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). *Buku panduan material cerdas untuk energi terbarukan*. Kementerian ESDM RI.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). *Roadmap industri hijau: Material berkelanjutan*. Kementerian LHK RI.

Kementerian Perindustrian. (2021). *Peta jalan pengembangan material komposit nasional 2021–2026*. Kementerian Perindustrian RI.

Kibert, C. J. (2016). *Sustainable Construction* (4th ed.). Wiley.

Kim, J. K., & Mai, Y. W. (1998). *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*. Elsevier.

Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to Ceramics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics* (8th ed.). Wiley.

Koç, M., & Özel, T. (2019). *Modern Manufacturing Processes*. Wiley.

Komite Nasional Keselamatan Transportasi. (2023). *Laporan penelitian keselamatan kendaraan: Analisis material rangka eSAF*. KNKT.

Kusmono. (2024). *Peluang dan tantangan pengembangan komposit serat alam di Indonesia*. Orasi Ilmiah Guru Besar, Universitas Gadjah Mada.

Lestari, S. (2021). *Pengantar ilmu logam*. Andalas University Press.

Li, Y. (2023). *Joining Technology and Application of Advanced Materials*. Springer Nature Singapore.

Loganathan, S., Valapa, R. B., Mishra, R. K., Pugazhenthi, G., & Thomas, S. (2017). *Thermal and rheological measurement techniques for nanomaterials characterization*. Elsevier / Matthew Deans.

Lololau, A., Purnomo, H., & Mustasyar. (2024). Development of ramie fiber reinforced PLA prepreg for automotive interior. *Jurnal Teknik Mesin UI*, 12(1), 33–40.

Low, I. M., & Dong, Y. (2021). *Composite Materials: Manufacturing, Properties and Applications*. Elsevier.

Lu, K., Lu, L., & Suresh, S. (2009). Strengthening Materials by Engineering Coherent Internal Boundaries at the Nanoscale. *Science*, 324(5925), 349–352.

Bagian 2: Abjad M – Z

M, S. (2021). *Mengenal Logam Sebagai Bahan Teknik*. Deepublish.

Malik, Y., Haryanto, P. P. P., Sarasanty, D., Masy'ari, Dewi, R. P., Setiawan, J., Mustofa, & Santoso, H. (2023). *Mekanika teknik*. PT Global Eksekutif Teknologi.

Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design* (3rd ed.). CRC Press.

Masriatini, R., et al. (2025). *Ilmu-Ilmu Material: Prinsip, Karakterisasi, dan Aplikasinya*. CV Get Press Indonesia.

Matthews, F. L., & Rawlings, R. D. (1994/2014). *Composite Materials: Engineering and Science*. Woodhead Publishing.

Mavinkere, R. S. (2024). *Natural fibers composites for engineering applications*. Kuliah Tamu, Universitas Brawijaya.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Menard, K. P. (2008). *Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction*. CRC Press.

Menczel, J. D., & Prime, R. B. (2009). *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*. Wiley.

Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601–605.

Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press.

Murrell, J. N., Kettle, S. F. A., & Tedder, J. M. (1987). *The Chemical Bond* (2nd ed.). Wiley.

Narayanan, R. G., & Gunasekera, J. S. (2019). *Sustainable Material Forming and Joining*. CRC Press.

Nasution, F. H., & Siregar, J. P. (2021). Application of natural fiber reinforced polymer composites in automotive components. *Journal of Mechanical Engineering*, 5(2), 45–52.

Neville, A. M. (2011/2012). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

O'Brien, D. J. (2011). Multifunctional materials and structures. *Advanced Materials & Processes*, 169(6), 24–28.

Öchsner, A., & Altenbach, H. (2016). *Machining, Joining and Modifications of Advanced Materials*. Springer Nature Singapore.

Olikrom. (2019). *What is a thermochromic material*. Olikrom.com.

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). *Eco-efficient construction and building materials*. Woodhead Publishing.

Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (2014). *Introduction to Spectroscopy*. Cengage Learning.

Petrucci, R. H., Herring, F. G., Madura, J. D., & Bissonnette, C. (2017). *Kimia Dasar: Prinsip-Prinsip dan Aplikasi Modern*. Erlangga.

Poole, C. P., & Owens, F. J. (2019). *Introduction to nanotechnology*. Wiley.

Pottathara, Y. B., Thomas, S., Kalarikkal, N., & Ninan, N. (2019). *Polymer materials: Processing, characterization, and applications*. CRC Press.

Prajapati, P., Raja, B. D., & Patel, V. (2024). Energy-economic analysis and optimization of a shell and tube heat exchanger using a multi-objective heat transfer search algorithm. *Thermal Science and Engineering Progress*, 56, 103021. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103021

Putri, D. A. (2022). Aplikasi polimer biokompatibel untuk perangkat medis. *Jurnal Teknik Biomedis*, 4(1), 25–32.

Raghavan, V. (2015). *Materials science and engineering: A first course* (6th ed.). PHI Learning.

Rahaman, M. N. (2007). *Ceramic Processing and Sintering* (2nd ed.). Marcel Dekker.

Rahman, F., & Santoso, B. (2021). Pemanfaatan material ramah lingkungan dalam sistem manufaktur modern. *Jurnal Rekayasa Material dan Manufaktur*, 4(1), 12–20.

Ram, A. (2018). *Fundamentals of polymer engineering*. CRC Press India.

Ramakrishna, S., Zhang, T., Lu, W. C., Qian, Q., & Lim, J. W. (2017). Materials informatics. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(7), 1591–1602.

Reimer, L. (2008). *Transmission Electron Microscopy: Physics of Image Formation* (5th ed.). Springer-Verlag.

Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction* (2nd ed.). NAPA Research and Education Foundation.

Rogers, J. A., Someya, T., & Huang, Y. (2010). Materials and mechanics for stretchable electronics. *Science*, 327(5973), 1603–1607.

Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2004). *Plastic Product Material and Process Selection Handbook*. Elsevier.

Said, N. A. (2020). *Pengertian Heat Treatment Pada Logam*. Teknik Jaya.

Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy. *Solar Energy*, 103, 682–703.

Santoso, H. (2017). Pengujian struktur mikro dan mekanik pada pipa ketel uap sebelum dan sesudah pemakaian selama 10 tahun. *Jurnal STRING*, 1(3).

Sari, R. P. (2021). Karakterisasi komposit hibrid serat rami/karbon. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 17(1), 10–18.

Schick, C. (2009). Differential scanning calorimetry (DSC) of semicrystalline polymers. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 395, 1589–1611.

Scrivener, K., et al. (2018). Eco-efficient cements. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.

Shackelford, J. F. (2015). *Introduction to materials science for engineers* (8th ed.). Pearson.

Sharma, A., et al. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.

Silverstein, R. M., & Webster, F. X. (2005). *Spectrometric Identification of Organic Compounds* (7th ed.). Wiley.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning.

Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (2019). *Modern physical metallurgy and materials engineering* (6th ed.). Butterworth-Heinemann.

Smith, W. F., & Hashemi, J. (2010/2016/2018). *Foundations of Materials Science and Engineering* (5th / 6th ed.). McGraw-Hill Education.

Sofia. (2023). *Komposit Besi: Bahan Revolusioner dalam Industri Konstruksi*. SMS Perkasa.

Sofyan, B. T. (2017). *Pengantar material teknik*. Salemba Teknika.

Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2001). *Metal Fatigue in Engineering*. Wiley.

Striegel, A. M., & Timpa, J. D. (2008). *Size-Exclusion Chromatography of Synthetic Polymers*. ACS Symposium Series.

Strong, A. B. (2006). *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications* (2nd ed.). SME.

Syarif, M., dkk. (2024). *Material Konstruksi*. Penerbit Tohar Media.

Tam, V. W. Y., & Tam, C. M. (2006). A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(3), 209–221.

Thangadurai, T. D., et al. (2020). *Nanostructured Materials*. Springer International Publishing.

Thangaraj, S. (2025). *The Perfect Welder Handbook: Mastering Welding Techniques, Safety, and Practical Skills for Every Welder*. Saravanakumar Thangaraj.

Thelning, K. E. (2013). *Steel and Its Heat Treatment: Bofors Handbook*. Butterworth-Heinemann.

Totten, G. E. (2006). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies* (2nd ed.). Taylor & Francis.

Tresna, P. S. (2024). *Pengembangan prepreg ramah lingkungan berbasis serat rami untuk aplikasi otomotif*. Laporan Penelitian, Universitas Indonesia.

Utracki, L. A. (2018). *Commercial polymer blends*. Springer.

Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials. *Materials*, 6(6), 2182–2217.

Van Vlack, L. H. (1989). *Elements of Materials Science and Engineering* (6th ed.). Addison-Wesley Publishing Company.

Verhoeven, J. D. (2010). *Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist* (3rd print). ASM International.

Widodo, T., & Nugroho, S. (2020). Perkembangan teknologi material dan implikasinya terhadap industri teknik mesin. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 15(1), 1–9.

Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science* (2nd ed.). Springer.

Yan, X., et al. (2020). Construction of a web-based nanomaterial database by big data curation and modeling friendly nanostructure annotations. *Nature Communications*, 11(1), 2519.

Yani, R. D., Pratomo, T., & Cahyono, H. (2008). Pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro logam St 60. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, 11(1), 96–109.

Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to Polymers* (3rd ed.). CRC Press.

INDEKS

A

Abrasif, 126, 131, 136
Adsorben, 294
Alotropi, 202
Alumina (Al_2O_3), 133, 135
Amorf, 150, 151, 160, 231
Antiferromagnetik, 108

B

Batas Proporsional, 57
Bearing, 134, 142
Biokeramik, 135, 257
Biomaterial, 9, 130
Blade, 90

D

Deformasi, 74, 88
Densitas, 150, 246, 267
Diamagnetik, 104
Differential Scanning Calorimetry (DSC), viii, 239, 241, 337
Dipol, vii, 48, 49, 50, 51, 236
Domain magnetik, 112
Durabilitas, v, 287, 294

E

Ekspansi, 83
Elastomer, 8, 141, 143, 144
Elektron, ii, vii, xi, 21, 22, 23, 24, 26, 28, 29, 31, 35, 40, 46, 222, 223, 226, 236
Elektron bebas, 46
Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS/EDX), 232
Etsa (Etching), 220

F

Fasa, 223
Ferrimagnetik, 109, 110
Ferromagnetik, 107
Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), 235, 236

G

Gaya van der Waals, 51

H

Hardness, 81, 125
Hidroksiapatit (HA), 135
Histeresis, viii, 114, 115
Histeresis Magnetik, 114

I

Ikatan Ionik, vii, viii, xi, 39, 40, 119, 122, 123, 124
Ikatan Kovalen, vii, viii, 42, 43, 119, 123, 124
Ikatan Logam, vii, 45
Isolator, ix, 88, 100, 103, 119, 127, 129, 131, 133, 136, 142, 257

K

Kalor, 83
Karakterisasi Material, iv, 217
Katalis, 149, 157
Kekerasan (Hardness), 64, 159
Kelelahan (Fatigue), 65
Keramik Teknik, 333
Ketangguhan (Toughness), 64, 159
Keuletan (Ductility), 63
Koersivitas, 114
Komposit, iv, viii, ix, xii, 2, 8, 10, 89, 176, 177, 179, 180, 182, 184, 185, 186, 188, 214, 245, 246, 247, 262, 264, 266, 267, 271, 272, 273, 307, 308, 333, 339, 349
Konduktifitas, 87, 89
Konduktivitas Termal, xii, 128, 246, 283
Konveksi, 84
Korosi, 9, 13, 78, 130, 161, 295, 316

Kristalinitas, xi, 149, 151, 152, 153, 157, 159

M

Magnetisasi, 112
Material Cerdas (Smart Materials), 269
Material Keramik, iii, viii, xi, 88, 120, 121, 122, 128, 131, 136
Matriks, iv, xi, 8, 177, 178, 180, 182, 184, 185, 188, 215, 225, 226, 236
Mikrostruktur, ii, viii, 4, 5, 207, 208, 313, 314
Modulus Elastisitas, 59, 246
Monomer, 149, 154, 156

N

Nanomaterial, 9, 267, 297

P

Paramagnetik, 106
Perlit, 204
Polimer, iii, iv, ix, xi, 2, 8, 9, 10, 44, 88, 89, 137, 139, 140, 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 155, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 169, 170, 184, 213, 231, 245, 246, 247, 258, 259, 261, 262

R

Radiasi, 85, 226, 236
Rayapan (Creep), 66
Refraktori, 121, 127, 131, 133
Remanensi, 114

S

Scanning Electron Microscopy (SEM), 221, 222, 223, 226, 232
Semikonduktor, 9, 13, 100, 102, 129
Sintering, 347
Superkonduktor, 129

T

Temperatur, 77, 84, 86, 87, 127, 141, 149, 157, 160, 169, 172, 173, 205

Termal, iii, iv, xi, 84, 85, 86, 88, 90, 127, 128, 131, 160, 161, 219, 237, 240, 282, 284, 337
Termoplastik, xi, 8, 141, 144, 184, 262
Termoset, 8, 141, 142, 144, 184, 262
Thermogravimetric Analysis (TGA), 238, 241
Transmission Electron Microscopy (TEM), 224, 226, 232

V

Viskoelastisitas, 73
VSM, 113

GLOSARIUM

Abrasif: Material keras yang digunakan untuk mengikis, menghaluskan, atau memotong permukaan material lain.

Adsorben: Material yang mampu menyerap zat lain pada permukaannya.

Adhesi (Adhesion): Daya lekat atau kemampuan ikatan antarmuka antara dua material yang berbeda, seperti antara matriks dan serat penguat.

Adisi (Polimerisasi Adisi): Reaksi pembentukan polimer dari monomer berikatan rangkap tanpa menghasilkan produk samping.

Advanced Ceramics: Keramik maju dengan tingkat kemurnian tinggi dan sifat khusus untuk aplikasi teknik modern.

Agitasi Termal: Gerakan acak partikel atau atom akibat energi panas yang dapat memengaruhi orientasi momen magnetik dan pergerakan elektron.

Alotropi: Fenomena termodinamika di mana suatu unsur padat (seperti besi) dapat mengubah struktur kisi kristalnya menjadi susunan atom yang berbeda akibat perubahan suhu.

Alotropi Besi (Iron Allotropy): Perubahan struktur kristal besi (ferit, austenit, martensit, dll.) akibat suhu.

Alumina (Al_2O_3): Material keramik berbasis aluminium oksida yang memiliki kekerasan, ketahanan aus, dan ketahanan panas tinggi.

Amorf: Struktur padatan yang tidak memiliki keteraturan atau pola susunan atom jangka panjang.

Anil (Annealing): Proses perlakuan panas (heat treatment) dengan cara memanaskan material lalu mendinginkannya secara perlahan di dalam tungku untuk melunakkan logam dan menghilangkan tegangan sisa.

Anisotropik: Sifat material yang memiliki nilai atau karakteristik mekanis yang berbeda ketika diukur dari arah orientasi yang berbeda.

Antiferromagnetik: Bahan yang memiliki momen magnetik atom tersusun antiparalel dan saling meniadakan secara teratur sehingga resultan magnetisasinya nol.

Arus Eddy: Arus listrik melingkar yang muncul dalam material konduktor akibat perubahan medan magnet.

Banjir: Peristiwa ketika air mengalir melampaui batas normal dan menggenangi daerah sekitarnya, seringkali akibat curah hujan yang tinggi.

Band Gap (Celah Energi): Perbedaan energi antara pita valensi dan pita konduksi pada material padat.

Batas Butir (Grain Boundary): Daerah antarmuka yang memisahkan dua butir kristal berorientasi beda; berfungsi menghambat pergerakan dislokasi.

Batas Proporsional: Batas tegangan tertinggi di mana hubungan antara tegangan dan regangan masih linier/proporsional.

Bearing: Komponen mesin yang berfungsi mengurangi gesekan antara bagian yang bergerak.

Biokeramik: Material keramik yang bersifat biokompatibel (seperti alumina dan hidroksiapatit) yang digunakan untuk implan atau rekayasa jaringan tubuh.

Biomaterial: Material yang dirancang khusus agar aman dan kompatibel saat berinteraksi dengan sistem biologis/tubuh manusia.

Biopolimer: Polimer yang dihasilkan oleh organisme hidup atau berbasis sumber daya alam terbarukan yang umumnya bersifat ramah lingkungan.

Bio-based Material: Material yang berasal dari sumber hayati terbarukan seperti bambu dan serat alam.

Brittleness (Kegetasan): Sifat material yang mudah patah tanpa mengalami deformasi plastis yang signifikan.

Breakdown Listrik: Kondisi ketika isolator mulai menghantarkan listrik akibat medan listrik sangat tinggi.

Bulk Forming: Proses pembentukan logam volume besar melalui deformasi tiga dimensi (seperti penempaan, ekstrusi, dan penarikan kawat).

Carbon Capture Concrete: Beton yang dirancang untuk menyerap atau mengikat karbon dioksida.

Carbon Footprint: Total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh suatu aktivitas atau material.

Cathodic Electro Deposition (CED): Proses pelapisan logam dengan cara elektrokimia untuk memberikan lapisan pelindung anti korosi yang merata.

Catalytic Converter: Komponen kendaraan yang digunakan untuk mengurangi emisi gas buang melalui reaksi katalitik.

CFRP: Komposit yang diperkuat serat karbon dalam matriks polimer, dikenal sangat kuat dan ringan.

Cool Roof: Material atap dengan reflektansi tinggi untuk mengurangi penyerapan panas matahari.

Crystal Structure (Struktur Kristal): Susunan atom yang teratur dan berulang dalam suatu material.

Deep Drawing: Pembentukan pelat tipis menjadi bentuk cekung (misalnya kaleng).

Deformasi Elastis: Perubahan bentuk sementara pada material akibat pembebanan yang akan kembali ke bentuk semula saat beban dilepas.

Deformasi Plastis: Perubahan bentuk permanen pada material setelah melewati batas luluh akibat pembebanan.

Densitas: Massa suatu material per satuan volume.

Derajat Polimerisasi (Degree of Polymerization / DP): Jumlah unit monomer yang bergabung membentuk satu molekul rantai polimer.

Diamagnetik: Sifat bahan yang memiliki kecenderungan lemah untuk menolak medan magnet luar karena seluruh elektronnya berpasangan.

Differential Scanning Calorimetry (DSC): Teknik analisis termal yang mengukur perbedaan laju aliran panas antara sampel dan referensi sebagai fungsi suhu.

Difusi: Proses perpindahan atau pergerakan atom/molekul di dalam material akibat energi termal.

Difisensial Scanning Calorimetry: Pengujian termal dengan cara mengukur perbedaan laju panas antara sampel uji dengan referensi inert.

Difusivitas Termal: Kemampuan suatu material untuk menghantarkan atau merambatkan panas dengan cepat.

Dipol: Pemisahan muatan listrik positif dan negatif pada skala atom atau molekul.

Dislokasi: Cacat garis pada struktur kristal yang pergerakannya menjadi mekanisme utama terjadinya deformasi plastis pada logam.

Doping: Proses penambahan atom pengotor (impurity) dalam jumlah terukur ke dalam semikonduktor murni untuk mengubah konduktivitas listriknya.

Domain Magnetik: Wilayah kecil dalam material magnetik yang memiliki arah magnetisasi seragam.

Durabilitas: Kemampuan material bertahan terhadap pengaruh lingkungan selama umur tertentu.

Eco-Tourism: Bentuk pariwisata yang berfokus pada pelestarian lingkungan dan memberikan manfaat ekonomi kepada komunitas lokal.

Elastomer: Jenis polimer dengan sedikit ikatan silang yang memiliki elastisitas sangat tinggi dan mampu kembali ke bentuk semula setelah mengalami deformasi besar.

Elektron Valensi: Elektron yang terletak pada kulit terluar atom dan berperan langsung dalam pembentukan ikatan kimia.

Embodied Energy: Total energi yang digunakan selama siklus hidup material.

Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS/EDX): Teknik analisis mikro yang digunakan untuk mengidentifikasi unsur-unsur kimia penyusun material berdasarkan spektrum sinar-X.

Exchange Interaction (Interaksi Pertukaran): Interaksi antar spin elektron yang menyebabkan keteraturan magnetik pada material ferromagnetik dan antiferromagnetik.

Etsa (Etching): Proses pengikisan kimiawi pada permukaan sampel metallografi untuk memperlihatkan struktur mikro dan batas butir di bawah mikroskop.

Ekstrusi (Extrusion): Mendorong billet logam melewati cetakan untuk menghasilkan profil panjang.

Fasa: Bagian material yang homogen secara fisik dan kimia serta dipisahkan oleh batas fasa yang jelas.

Ferrimagnetik: Bahan yang memiliki susunan momen magnetik antiparalel tetapi besarnya tidak seimbang, sehingga menghasilkan net magnetisasi makroskopis.

Ferromagnetik: Bahan yang memiliki sifat magnetik sangat kuat akibat pensejajaran spontan momen magnetik atom dalam domain-domain.

Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR): Teknik spektroskopi yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan ikatan molekul organik/polimer.

Friction Stir Welding: Pengelasan padat dengan gesekan dan deformasi plastis tanpa peleburan.

Gaya van der Waals: Gaya ikatan sekunder bersifat fisik yang relatif lemah antar atom atau molekul akibat interaksi dipol.

Graphene: Lembaran karbon setebal satu atom dengan susunan heksagonal, memiliki konduktivitas listrik dan kekuatan mekanik luar biasa.

Gouy Balance: Metode pengukuran sifat magnetik berdasarkan gaya tarik atau tolak material dalam medan magnet.

Hibridisasi (Orbital Hibrida): Penggabungan orbital-orbital atom (seperti s dan p) menjadi orbital baru bertingkat energi sama untuk membentuk ikatan kimia.

Histeresis Magnetik: Fenomena keterlambatan perubahan induksi magnetik (B) terhadap perubahan kuat medan magnet eksternal (H).

HOTS (Higher Order Thinking Skills): Pendekatan pembelajaran keterampilan berpikir tingkat tinggi yang memicu analisis mendalam.

Ikatan Ionik: Ikatan kimia yang terbentuk akibat serah terima elektron antara atom logam (kation) dan nonlogam (anion).

Ikatan Kovalen: Ikatan kimia yang terbentuk akibat penggunaan bersama pasangan elektron oleh atom-atom yang berikatan.

Ikatan Logam: Ikatan yang terjadi akibat daya tarik elektrostatik antara ion-ion positif logam dengan kumpulannya dalam "lautan elektron" bebas.

Ikatan Silang (Cross-linking): Ikatan kimia atau kovalen yang menghubungkan rantai-rantai polimer satu sama lain sehingga membentuk jaringan yang kaku.

Indeks Kinerja (Performance Index): Parameter kuantitatif yang digunakan dalam pemilihan material untuk mengoptimalkan desain teknis.

Induksi Magnetik (B): Besaran yang menunjukkan kuat medan magnet dalam suatu material.

Isolator: Material yang memiliki konduktivitas listrik atau termal sangat rendah.

Isotop: Variasi dari suatu unsur kimia yang memiliki jumlah proton sama tetapi jumlah neutron berbeda di dalam intinya.

Karakterisasi Material: Investigasi ilmiah untuk mengidentifikasi struktur internal, komposisi kimia, mikrostruktur, dan cacat pada bahan.

Katalis: Zat yang mempercepat laju reaksi kimia (seperti reaksi polimerisasi) tanpa ikut terkonsumsi secara permanen.

Keelektronegatifan: Ukuran kemampuan atau kecenderungan suatu atom untuk menarik elektron dalam ikatan kimia.

Kelelahan (Fatigue): Kegagalan atau kerusakan struktur material akibat pembebanan berulang (siklik) di bawah batas kekuatan tariknya.

Kekerasan (Hardness): Ketahanan permukaan material terhadap deformasi plastis lokal, penekanan, penetrasi, atau goresan.

Kekuatan Geser (Shear Strength): Kemampuan material menahan gaya yang bekerja sejajar dengan bidang penampangnya.

Kekuatan Lentur (Flexural Strength): Tegangan maksimum yang mampu ditahan material saat mengalami pembebanan melengkung/bengkok sebelum patah.

Kekuatan Tarik Maksimum (Ultimate Tensile Strength / UTS): Tegangan terbesar yang dapat ditanggung oleh

material pada uji tarik sebelum mengalami leheran (necking) dan patah.

Kekuatan Tekan (Compressive Strength): Kemampuan material dalam menahan beban desak atau tekan aksial maksimum.

Ketangguhan (Toughness): Kemampuan material untuk menyerap energi dan mengalami deformasi plastis sebelum patah.

Ketangguhan Retak (Fracture Toughness / KIC): Resistensi material terhadap perambatan retak yang sudah ada di dalamnya.

Keuletan (Ductility): Derajat deformasi plastis yang mampu dialami material sebelum patah; diukur melalui persen perpanjangan.

Koersivitas (Hc): Kuat medan magnet luar berlawanan arah yang diperlukan untuk menghilangkan magnetisasi sisa pada bahan.

Komposit: Material rekayasa yang dibuat dari penggabungan dua atau lebih bahan berbeda fasa secara makroskopis (matriks dan penguat).

Kondensasi (Polimerisasi Kondensasi): Reaksi pembentukan polimer yang disertai dengan pelepasan molekul kecil sebagai produk sampingan (seperti air atau HCl).

Konduktivitas Listrik (σ): Ukuran kemudahan suatu material dalam menghantarkan arus listrik.

Konduktivitas Termal: Kemampuan material untuk merambatkan panas dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah.

Kristalinitas: Tingkat keteraturan susunan atom atau molekul rantai polimer di dalam suatu padatan.

Kurva Histeresis: Grafik hubungan antara medan magnet dan magnetisasi material.

Laser Flash Analysis: Pengujian material yang menggunakan sampel uji berbentuk cakram tipis yang di kondisikan pada temperatur tertentu.

Material Cerdas: Material fungsional yang mampu merespons dan beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan (seperti suhu, tegangan, medan listrik/magnet).

Material Keramik: Material anorganik dan nonlogam yang tersusun atas ikatan ionik/kovalen, tahan suhu tinggi, keras, dan getas.

Material Maju (Advanced Materials): Kelompok material modern dengan fungsi spesifik tinggi (seperti nanomaterial, biomaterial, superkonduktor).

Matriks: Fase kontinu dalam komposit yang berfungsi mengikat penguat, mendistribusikan beban, dan melindungi penguat dari lingkungan luar.

Mekanika Kuantum: Teori fisika yang menjelaskan perilaku partikel pada skala atomik dan subatomik.

Metallografi: Ilmu dan teknik penyiapan serta pemeriksaan mikrostruktur permukaan logam.

Mikrostruktur: Struktur internal bahan meliputi ukuran butir, fasa, dan cacat yang diamati dengan bantuan mikroskop.

Modulus Elastisitas (Modulus Young, E): Ukuran kekakuan material yang menyatakan rasio antara tegangan dan regangan pada daerah elastis.

Monomer: Molekul sederhana berukuran kecil yang dapat bereaksi secara kimia membentuk rantai molekul raksasa (polimer).

MRI (Magnetic Resonance Imaging): Teknologi pencitraan medis berbasis medan magnet dan resonansi inti atom.

Nanomaterial: Material yang memiliki fitur atau dimensi struktur internal pada skala 1 hingga 100 nanometer.

Necking (Leheran): Penurunan luas penampang secara lokal yang terjadi pada spesimen ulet selama pengujian tarik.

Normalisasi (Normalizing): Pemanasan di atas suhu kritis lalu pendinginan udara untuk memperhalus butir.

Paramagnetik: Sifat bahan yang tertarik lemah oleh medan magnet luar karena memiliki elektron yang tidak berpasangan.

Peleburan (Smelting): Proses ekstraksi metalurgi untuk menghasilkan logam cair dari bijihnya pada suhu tinggi melalui reaksi reduksi.

Pematrian (Brazing): Penyambungan dengan melelehkan logam pengisi, bukan logam induk.

Pengecoran (Casting): Menuangkan logam cair ke cetakan untuk membentuk produk.

Pengelasan (Welding): Proses penyambungan dua atau lebih bagian material secara permanen melalui pembentukan ikatan atomik dengan panas/tekanan.

Pengelasan Fusi (Fusion Welding): Penyambungan logam dengan melelehkan logam induk dan pengisi.

Pengarah (Reinforcement) / Penguat: Fase terdispersi pada komposit (seperti serat atau partikel) yang menanggung beban utama.

Pengerasan (Quenching): Proses pendinginan cepat logam dari suhu austenitisasi (dalam air atau minyak) untuk membentuk fasa martensit yang sangat keras.

Pengerasan (Quenching/Hardening): Pendinginan cepat untuk menghasilkan struktur martensit keras.

Penarikan Kawat (Wire Drawing): Proses menghasilkan kawat halus dengan menarik logam melalui cetakan.

Penempaan (Forging): Pembentukan logam dengan pukulan atau tekanan.

Penyusutan (Shrinkage): Pengurangan volume material selama pembekuan, pendinginan, atau proses pengeringan.

Perlakuan Panas (Heat Treatment): Kombinasi proses pemanasan dan pendinginan terkontrol pada logam padat untuk mengubah struktur mikro dan sifat mekanisnya.

Pita Konduksi: Pita energi elektron teratas yang terisi sebagian atau kosong, di mana elektron dapat bergerak bebas menghasilkan arus listrik.

Pita Valensi: Pita energi terluar yang terisi oleh elektron valensi dalam kondisi dasar.

Piezoelektrik: Kemampuan material untuk menghasilkan tegangan listrik saat dikenai tekanan mekanik, atau sebaliknya.

Polimer: Material molekul raksasa (makromolekul) berbentuk rantai panjang yang tersusun dari pengulangan unit-unit monomer.

Prepreg: Serat penguat yang telah diresapi dengan resin polimer (belum mengeras), siap untuk dicetak dan dikeringkan.

Radiasi Termal: Energi dari sebuah benda yang berupa gelombang elektromagnetik akibat perubahan struktur elektron penyusun.

Rasio Poisson (ν): Perbandingan antara regangan lateral (transversal) dengan regangan aksial (longitudinal) pada daerah elastis.

Rayapan (Creep): Deformasi plastis permanen yang terjadi secara perlahan pada beban konstan dalam jangka waktu lama, terutama pada suhu tinggi.

Refraktori: Material keramik tahan api yang mampu mempertahankan kekuatan dan stabilitas fisiknya pada suhu sangat tinggi.

Regangan (Strain, ε): Ukuran deformasi relatif atau perubahan panjang per satuan panjang awal akibat pembebanan.

Remanensi (Br): Induksi atau magnetisasi sisa yang tertinggal pada bahan ferromagnetik saat medan magnet luar diturunkan ke nol.

Resistivitas (ρ): Ukuran hambatan internal intrinsically suatu material terhadap aliran arus listrik.

Scanning Electron Microscopy (SEM): Mikroskop elektron pencerap yang memindai permukaan sampel dengan

berkas elektron untuk menghasilkan citra topografi berkresolusi tinggi.

Semikonduktor: Material yang memiliki tingkat konduktivitas listrik di antara konduktor dan isolator, dengan celah energi (band gap) yang relatif sempit.

Shape Memory Alloy (SMA): Paduan logam yang dapat kembali ke bentuk aslinya setelah dipanaskan, meskipun sebelumnya telah dideformasi.

Sintering: Proses pemadatan dan penyatuan serbuk material (keramik atau logam) melalui pemanasan di bawah titik leburnya.

Spintronik: Bidang teknologi yang memanfaatkan spin elektron dalam perangkat elektronik.

SQUID Magnetometer: Instrumen sangat sensitif untuk mengukur sifat magnetik material berdasarkan interferensi kuantum superkonduktor.

Strength-to-Weight Ratio: Rasio antara kekuatan material terhadap densitasnya, indikator efisiensi material untuk aplikasi ringan.

Superkonduktor: Material yang kehilangan hambatan listrik secara total dan menolak medan magnet pada suhu sangat rendah.

Suseptibilitas Magnetik (χ): Ukuran keperspektifan atau derajat magnetisasi suatu material sebagai respons terhadap medan magnet eksternal.

Tegangan (Stress, σ): Intensitas gaya dalam per satuan luas penampang yang menahan beban luar.

Tegangan Geser (τ): Tegangan yang bekerja sejajar dengan bidang penampang material.

Tegangan Luluh (Yield Strength): Batas tegangan saat material mulai beralih dari deformasi elastis ke deformasi plastis permanen.

Temper (Tempering): Pemanasan ulang logam hasil quenching pada suhu di bawah garis kritis untuk mengurangi kerapuhan dan meningkatkan ketangguhan.

Temperatur Curie (Tc): Suhu kritis di mana bahan ferromagnetik/ferrimagnetik kehilangan sifat magnetiknya dan berubah menjadi paramagnetik.

Temperatur Néel: Temperatur transisi material antiferromagnetik menjadi paramagnetik.

Temperatur Transisi Gelas (Tg): Suhu saat polimer amorf berubah dari kondisi keras/getas seperti kaca menjadi lunak/elastis.

Termoplastik: Jenis polimer yang dapat melunak jika dipanaskan dan mengeras kembali jika didinginkan secara berulang tanpa mengalami perubahan kimia utama.

Termoset: Polimer yang mengalami pengerasan permanen berkat terbentuknya ikatan silang saat dipanaskan, sehingga tidak dapat dilelehkan kembali.

Thermogravimetric Analysis (TGA): Metode analisis termal yang mengukur perubahan massa sampel secara kontinu sebagai fungsi perubahan suhu.

Thermogravimetrik Analysis: Pengujian kuantitatif yang mengukur perubahan masa sampel uji.

Transmission Electron Microscopy (TEM): Mikroskop elektron transmisi yang meneruskan berkas elektron

menembus spesimen sangat tipis untuk menganalisis struktur kristal dan cacat skala atomik.

Uji Impak (Impact Test): Pengujian mekanis (seperti metode Charpy atau Izod) untuk mengukur ketangguhan dan energi yang diserap material saat menerima beban kejutan/benturan mendadak.

Uji Tarik (Tensile Test): Pengujian mekanis standar dengan menarik spesimen secara aksial untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan dan parameter kekuatan material.

Vibrating Sample Magnetometer (VSM): Alat karakterisasi magnetik yang mengukur magnetisasi material berdasarkan induksi elektromagnetik akibat getaran sampel.

Viskoelastisitas: Sifat material (seperti aspal atau polimer) yang menunjukkan kombinasi karakteristik viskos (aliran) dan elastis secara bersamaan.

X-Ray Diffraction (XRD): Teknik karakterisasi berbasis difraksi sinar-X yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristal, susunan atom, dan parameter kisi material.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Muhammad Syarif ST., MT., SH., MH., MM., IPM., MPU., ASEAN ENg

Dosen dan Praktisi Ahli Hukum Kontrak Konstruksi

Penulis Lahir di Ujung Pandang pada tanggal 16 September 1971. menyelesaikan pendidikan S-1 fakultas teknik tahun 1997. Gelar S-2 (MT) Fakultas Teknik konsentrasi Struktur Konstruksi dan Material tahun 2013. Gelar S-3 (Dr) Fakultas Teknik juga pada bidang konsentrasi Struktur Konstruksi dan Material tahun 2019. Gelar S-2 (MM) Ekonomi Manajemen pada tahun 2018, Gelar S-1 (SH) Ilmu Hukum Pidana tahun 2025, Gelar S-2 (MH) Ilmu Hukum Pidana tahun 2023. Gelar Insinyur Profesional Madya (IPM) pada 2018. Studi profesi Insinyur (Ir) tahun 2021. Gelar Ahli Manajemen Proyek (MPU) thn 2022, demikian pula penganugerahan gelar ASEAN Eng diperoleh pada tahun 2022 di Phnom Penh Kamboja. Aktif sebagai pemateri dalam berbagai Simposium Internasional dan Nasional. Selain sebagai ahli konstruksi, penulis juga sebagai Ahli Hukum Kontrak Konstruksi.

BIODATA PENULIS



Imah Luluk Kusminah, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Pengelasan dan Fabrikasi

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Penulis lahir di Gresik tanggal 7 Maret 1992. Penulis adalah dosen di Program Studi Teknik Pengelasan dan Fabrikasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Penulis aktif menekuni bidang menulis, baik menulis jurnal maupun buku. Penulis juga aktif dalam melakukan penelitian dan pengabdian masyarakat. Google schoolar penulis dapat dicek melalui link https://scholar.google.com/citations?user=d3iCjV8AAAAJ&hl=en&oi=ao. Bidang keahlian penulis adalah ilmu bahan, teknik pengelasan, polimer & komposit, korosi, dan Quality Control. Alamat penulis di Perum Grand Surya D3-12 Sidoarjo, atau bisa dihubungi di alamat email berikut : imahluluk@ppns.ac.id.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. H. Arqam Laya, M.T.

Dosen Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik Universitas Negeri Gorontalo

Penulis adalah salah seorang dosen pada Departement of Civil Engineering, State University of Gorontalo. Lahir di Gorontalo Tahun 1964. Alumni: Insinyur Teknik Sipil Bidang Keahlian Rekayasa Struktur UNSRAT Manado (Lulus 1990), Magister Teknik Sipil Bidang Rekayasa Struktur UGM (Lulus 2007), dan Doktor Ilmu Geografi UGM (Lulus 2013) Bidang Keahlian Struktur & Mitigasi Bencana Alam Berbasis Geospasial. Jabatan Strutural Akademik pernah di emban: KAJUR Teknik Arsitektur UNG 2001-2005, Kepala Laboratorium Teknik Sipil UNG 2003-2005 & 2020-2023, KAPRODI Teknik Sipil UNG 2007-2009 & 2017-2023. Salah satu pendiri Sekolah Tinggi Teknik Bina Taruna Gorontalo, Jurusan Sipil Fakultas Teknik UNG dan Jurusan Sipil Universitas Gorontalo. Mengampu mata kuliah: Struktur Beton II, Struktur Baja II, Struktur Kayu dan Bambu, Analisis Struktur Statis Tertentu, Analisis Struktur Statis Tak Tentu, Kalkulus (II-III) dan Fisika untuk Teknik Sipil. Capaian karya tulis artikel dan buku yang telah diterbitkan, berupa artikel jurnal nasional dan international berkaitan tanah, infiltrasi,

geomorphologi, kebencanaan. Dalam bentuk buku berkaitan dengan analisis struktur, teknologi beton, beton bertulang, jembatan BM 100. Selain sebagai akademisi, juga berkecimpung sebagai konsultan dan tenaga ahli di bidang Rekayasa Struktur Konstruksi Bangunan Sipil, Perencanaan Wilayah dan Kota, Mitigasi Bencana Alam, dan Asesor Direktorat Pendidikan Tinggi (Dikti). Di bidang organisasi profesional, saat ini sebagai pengurus dan anggota PII, HATHI, HPJI, Aptekindo dan LPJK Provinsi Gorontalo. Bidang organisasi sosial sebagai pengurus & anggota Duango lo Adati Provinsi Gorontalo. Email: arqamlaya@gmail.com dan arqam@ung.ac.id.

BIODATA PENULIS



Ir. Habibi Santoso, S.T., M.T.

Dosen Program Studi DIII Pemeliharaan Mesin

Politeknik Negeri Media Kreatif

Penulis lahir di Jakarta, pada tanggal 28 Juli 1985. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi DIII Pemeliharaan Mesin Politeknik Negeri Media Kreatif Jakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Budi Utomo dan pada tahun 2010 dan menyelesaikan S2 pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila pada tahun 2015. Pengalaman di bidang otomotif, industri dan konsultan *Mechanical & Electrical* selama 11 tahun.

BIODATA PENULIS



Dr. Jan Setiawan, S.Si., M.Si.

Periset Badan Riset dan Inovasi Nasional

Dosen Program Studi Teknik Elektro - Universitas Pamulang

Penulis lahir di Jakarta pada tahun 1980. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Institut Pertanian Bogor pada Program studi Fisika tahun 2003. Penulis melanjutkan Pendidikan S2 program studi ilmu bahan-bahan di Universitas Indonesia pada tahun 2008 dan menyelesaikan pendidikan pada tahun 2010. Dilanjutkan pendidikan S3 di program studi yang sama pada tahun 2012 dan diselesaikan pada tahun 2015. Tahun 2026, penulis diberi amanah sebagai Kepala Pusat Teknologi Bahan Bakar dan memiliki jabatan Peneliti Ahli Madya di Badan Riset dan Inovasi Nasional. Selain itu, juga menjadi pengajar pada Program Studi Teknik Elektro Universitas Pamulang. Penulis memiliki kepakaran dalam bidang teknik material. Mulai aktif menulis berbagai buku untuk bidang MIPA dan keteknikan semenjak tahun 2020. Beberapa tulisan telah dihasilkan juga dalam jurnal nasional yang terakreditasi maupun jurnal internasional bereputasi. Penulis juga aktif sebagai editor untuk jurnal ilmiah nasional dan mitra bestari untuk jurnal ilmiah baik

nasional maupun internasional. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: jansetiawan.lecturer@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Ir. Gideon Kajang., MT.

Dosen STITEK Dharma Yadi Makassar

Penulis lahir di Seriti. Kabupaten Luwu Tanggal 5 Oktober 1961. Penulis adalah dosen pada Progran Studi Teknik Industri STITEK Dharma Yadi Makassar. Meraih gelar akademik Magister tahun 2009, pada program studi teknik mesin di Universitas Hasanuddin. Menjabat sebagai wakil ketua bidang akademik tahun 2019 – 2022.

Penulis saat ini aktif mengajar matakuliah Proses Produksi, Material Teknik, Mekanika Teknik, dan aktif meneliti dan publikasi baik dijurnal nasional terindeks sinta maupun dijurnal internasional terindeks scopus.

BIODATA PENULIS



Ir. Wenny Marthiana, M.T.

Dosen Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta

Penulis lahir di Palembang pada 29 Maret 1968. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Teknik Mesin, Faku;tas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta Padang, Penulis menyelesaikan Pendidikan Si dan S2 pada Jurusan Teknik Mesin.

BIODATA PENULIS



Ir. Badaruddin Anwar, S.Pd., M.Pd.

Dosen Jurusan Pendidikan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar

Penulis lahir di Cikowang tanggal 15 Agustus 1975. Penulis adalah Dosen tetap pada Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar. Menyelesaikan Pendidikan Sarjana pada Jurusan Pendidikan Teknik Mesin di Universitas Negeri Makassar tahun 2000 dan pendidikan S2 Kependidikan di Universitas yang sama pada tahun 2005, serta pendidikan profesi Insinyur di Universitas Muslim Indonesia, Makassar pada tahun 2017.

Mata kuliah yang diajarkan antara lain: Pengujian dan Pemeriksaan Bahan, Pengetahuan Bahan Teknik, Praktik Mesin Perkakas, serta Pengujian Las.

BIODATA PENULIS



Rahmad Surya Hadi Saputra

Dosen Program Studi Teknik Pengolahan Produk Perikanan

Politeknik Kelautan dan Perikanan Karawang

Penulis dilahirkan di Mataram tanggal 03 April 1984. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Teknik Pengolahan Produk Perikanan Politeknik Kelautan dan Perikanan Karawang. Menyelesaikan pendidikan D4 pada bidang permesinan perikanan dan melanjutkan S2 pada bidang *productivity and Innovation Development* serta menamatkan Pendidikan S3 pada bidang teknologi perikanan laut. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: rahmad2002@gmail.com, rahmad.saputra@kkp.go.id.

BIODATA PENULIS



Ludvi Arif Wibowo, ST.,MT.

Dosen Program Studi Teknik Mesin Politeknik Sukabumi

Penulis lahir di Bantul, 27 Maret 1987, Lulus Sarjana Teknik dari Institut Sains & Teknologi Akprind Yoyakarta pada tahun 2009. Magister Teknik Mesin diraih dari Universitas Pancasila pada tahun 2015. Sejak 2010, bekerja sebagai praktisi di perusahaan asing sebagai *Quality Project Leader* di PT. Chemco Harapan Nusantara Plant Karawang hingga Agustus 2018 dan dari Oktober 2018 hingga saat ini sebagai General Manager di PT. Kuramo Indonesia Berdaya, Sukabumi. Berkarir menjadi dosen dimulai saat diangkat menjadi dosen tetap Teknik Mesin di Sekolah Tinggi Teknik Karawang dari 2015 hingga 2018, kemudian dilanjutkan menjadi Dosen Tetap Program Studi Teknik Mesin di Politeknik Sukabumi dari 2018 hingga saat ini.

BIODATA PENULIS



Cahyo Wibowo, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Mpu Tantular Jakarta

Penulis merupakan putra dari Alm. Bapak Suratno dan Ibu Sutarni terlahir di Wonogiri, 14 September 1972, Sejak lulus jurusan Teknik mesin program pascasarjana Universitas Pancasila pada Tahun 2018. Kini penulis sedang bekerja di perusahaan swasta bidang *engineering* sektor energi yaitu *compressed natural gas* dan bekerja paruh waktu juga sebagai dosen tetap program studi Teknik mesin di Universitas Mpu tantular Jakarta, serta dalam prosesn melanjutkan pendidikan program Doktoral Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret Surakarta. Kini kesibukan penulis ialah lebih menghabiskan waktu untuk bekerja di bidang *engineering* di perusahaan yang saat ini bekerja serta mengajar dan menulis. Karya-karya yang telah dibuat dimuat di media *online*, jurnal nasional, jurnal internasional dan jurnal nasional bereputasi. Penulis juga aktif mengembangkan mesin-mesin dan peralatan yang digunakan dalam sistem distribusi *compressed natural gas*. Pada beberapa kesempatan penulis malakukan penelitian sesuai bidangnya dan beberapa telah dijurnalkan selain itu sebagai bagian dari masyarakat di

lingkungan tempat tinggalnya penulis juga melaksanakan pengabdian kepada masyarakat.

BIODATA PENULIS



Nenny Roostrianawaty, ST.,MT

Dosen Program Studi Teknik Sipil S-1

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Institut Teknologi Nasional Malang

Penulis lahir di Malang tanggal 21 Juni 1975. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil S-1 Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Pengairan Institut teknologi Nasional Malang (1997) dan menyelesaikan studi jenjang S2 pada Jurusan Teknik Sipil Konsentrasi Teknik Sumberdaya Air Universitas Brawijaya Malang (2000). Saat ini penulis sedang menyelesaikan studi Doktoral di Program Studi Teknik Sumberdaya Air Universitas Brawijaya Malang dan merupakan dosen tetap sekaligus Sekretaris Program Studi Teknik Sipil S-1 Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang dengan bidang keahlian Hidrologi, Hidraulika, Mekanika Fluida, Irigasi, Drainase dan Sumberdaya Air.

BIODATA PENULIS



Luluk Edahwati

Penulis lahir di Surabaya tanggal 11 Juni 1964. Penulis merupakan dosen tetap Fakultas Teknik prodi Teknik Mesin Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur. Alhamdulillah penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada tahun 1990 di jurusan Teknik Kimia di UPNVJT kemudian melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Kimia di ITS Surabaya (1997 -2001). Jenjang S3 penulis selesaikan di UNDIP Semarang jurusan Teknik Mesin dengan spesifikasi material (2015 – 2018). Semoga sedikit materi yang penulis berhasil selesaikan dapat bermanfaat.