

ILMU BAHAN LISTRIK

Penyusun:
Jan Setiawan
Mardiansyah
Ariyawan Sunardi
Heri Kusnadi



Jl. Surya Kencana No. 1 Pamulang
Gd. A, Ruang 212 Universitas Pamulang
Tangerang Selatan – Banten

ILMU BAHAN LISTRIK

Penulis:

Jan Setiawan
Mardiansyah
Ariyawan Sunardi
Heri Kusnadi

ISBN: 978-623-6352-85-4

Editor:

Angga Septian M.N
Aripin Triyanto

Tata Letak

Kusworo
Ramdani Putra

Desain Sampul

Putut Said Permana

Penerbit:

Unpam Press

Redaksi:

Jl. Surya Kencana No. 1
R. 212, Gd. A Universitas Pamulang Pamulang I Tangerang Selatan I Banten
Tlp/Fax: 021-741 2566 – 7470 9855 Ext: 1073
Email: unpampress@unpam.ac.id

Cetakan pertama, 11 Februari 2022

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin penerbit.

DATA PUBLIKASI UNPAM PRESS

| Lembaga Penerbit dan Publikasi Universitas Pamulang

Gedung A. R. 212 Kampus 1 Universitas Pamulang

Jalan Surya Kencana Nomor 1 Pamulang Barat, Tangerang Selatan, Banten

Website: www.unpam.ac.id | Email: unpampress@unpam.ac.id

Ilmu Bahan Listrik / Jan Setiawan, Mardiansyah, Ariyawan Sunardi dan Heri Kusnadi
- 1STed

ISBN. 978-623-6352-85-4

1. Ilmu Bahan Listrik I. Jan Setiawan, II. Mardiansyah, III. Ariyawan Sunardi, IV. Heri
Kusnadi

M215-11022022-01

Ketua Unpam Press: Pranoto

Koordinator Editorial: Aden

Koordinator Hak Cipta: Susanto

Koordinator Produksi: Dameis Surya Anggara

Koordinator Publikasi: Kusworo, Heri Haerudin

Koordinator Dokumentasi: Ramdani Putra, Nara Dwi Angesti

Desain Cover: Putut Said Permana

Cetakan pertama, 11 Februari 2022

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa ijin penerbit.

MATA KULIAH ILMU BAHAN LISTRIK

IDENTITAS MATA KULIAH

Program Studi	: Teknik Elektro / TEL0152
SKS	: 2 SKS
Prasyarat	: -
Semester	: III
Deskripsi Mata Kuliah	: Mata Kuliah Ilmu Bahan Listrik merupakan mata kuliah yang mempelajari mengenai bahan dan karakteristiknya. Setiap Bahan tersusun atas atom dan molekul. Bahan memiliki karakteristik termal yang terkait perilaku bahan terhadap temperatur dan panas, karakteristik mekanik yang terkait dengan ketahanan terhadap beban mekanis, dan karakteristik elektrik yang terkait dengan kemampuan bahan menghantarkan arus listrik. Karakteristik ini akan mempengaruhi penggunaan bahan pada lingkungan dan kondisi batas tertentu, dimana bahan dapat dimanfaatkan dengan baik. Pembahasan mata kuliah Ilmu Bahan Listrik ini meliputi struktur atom dan molekul, bahan isolator, polimer, keramik, dielektrik, komposit, logam, konduktor, magnetik, semikonduktor dan superkonduktor beserta karakteristik termal, mekanik dan listriknnya.
Capaian Pembelajaran	: Setelah mempelajari mata kuliah ini mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan tentang: struktur atom dan molekul sebagai penyusun bahan, karakteristik mekanik termal dan listrik serta aplikasi dari bahan isolator, dielektrik, konduktor, magnetik, semikonduktor, dan superkonduktor.
Penyusun	: 1. Dr. Jan Setiawan, S.Si, M.Si. 2. Mardiansyah, S.T, M.Kom. 3. Ariyawan Sunardi, S.Si, M.T. 4. Heri Kusnadi, S.T, M.T.

Tangerang Selatan, 11 Februari 2022

**Ketua Program Studi
Teknik Elektro S-1**

Ketua Tim Penyusun

Ariyawan Sunardi, S.Si, M.T.
NIDN. 0410108208

Dr. Jan Setiawan, S.Si, M.Si.
NIDK. 8874700016

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat-Nya yang telah tercurah, sehingga penulis bisa menyelesaikan bahan ajar mata kuliah Ilmu Bahan Listrik ini. Adapun tujuan dari disusunnya bahan ajar ini selain sebagai materi pegangan dalam menyelesaikan mata kuliah Ilmu Bahan Listrik adalah untuk memberikan wawasan kepada mahasiswa mengenai penyusun dan struktur bahan beserta karakteristik termal, mekanik dan kelistrikannya.

Penyusun dan struktur bahan, akan memberikan gambaran mekanisme interaksi secara fisika dan kimia yang dapat terjadi pada bahan. Mekanisme ini yang akan mempengaruhi karakteristik termal, mekanik dan kelistrikan pada bahan.

Tersusunnya bahan ajar ini merupakan bentuk kolaborasi dan kerja keras tim penulis. Dukungan dari berbagai pihak baik secara moral maupun material sangatlah membantu tersusunnya bahan ajar ini. Dengan segenap hati penulis mengucapkan terima kasih kepada keluarga, sahabat, rekan-rekan, dan pihak-pihak lainnya yang telah membantu secara moral dan material bagi tersusunnya buku ajar ini.

Bahan ajar yang tersusun sekian lama ini tentu masih jauh dari kata sempurna. Kritik dan saran yang membangun sangat diperlukan agar buku ini bisa lebih baik kedepannya.

Tangerang Selatan, 11 Februari 2022

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

ILMU BAHAN LISTRIK	ii
DATA PUBLIKASI UNPAM PRESS	iii
IDENTITAS MATA KULIAH	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
PERTEMUAN 1	1
STRUKTUR ATOM DAN MOLEKUL.....	1
A. Tujuan Pembelajaran	1
B. Uraian Materi	1
1. Klasifikasi Bahan.....	1
2. Atom, Model Atom, Struktur Atom dan Ikatan Atom.....	5
C. Latihan Soal	12
D. Daftar Pustaka.....	13
PERTEMUAN 2	14
BAHAN ISOLASI PADAT	14
A. Tujuan Pembelajaran	14
B. Uraian Materi	14
1. Bahan Isolasi	14
2. Isolator Padat.....	22
C. Latihan Soal	26
D. Daftar Pustaka.....	27
PERTEMUAN 3	28
BAHAN ISOLASI CAIR.....	28
A. Tujuan Pembelajaran	28
B. Uraian Materi	28

1. Penemuan Bahan Isolasi Cair.....	28
2. Larutan Gas	35
C. Latihan Soal	39
D. Daftar Pustaka	39
PERTEMUAN 4	40
BAHAN ISOLASI GAS.....	40
A. Tujuan Pembelajaran	40
B. Uraian Materi	40
1. Bahan isolasi gas	40
2. Isolator Gas Sederhana	42
C. Latihan Soal	52
D. Daftar Pustaka	52
PERTEMUAN 5	53
BAHAN POLIMER.....	53
A. Tujuan Pembelajaran	53
B. Uraian Materi	53
1. Isolator polimer	53
2. Jenis Polimerisasi	58
3. Kategori Polimer.....	59
4. Penggolongan Beberapa Kelompok Polimer.....	61
C. Latihan Soal	66
D. Daftar Pustaka	66
PERTEMUAN 6	67
BAHAN KERAMIK.....	67
A. Tujuan Pembelajaran	67
B. Uraian Materi	67
1. Isolator Keramik	67
2. Bahan Tambang Keramik.....	71

3. Kaca dan Porselin	72
4. Penerapan Keramik Sebagai Isolator	72
5. Arus Bocor Pada Isolator Keramik	76
C. Latihan Soal	78
D. Daftar Pustaka	79
PERTEMUAN 7	80
BAHAN KOMPOSIT	80
A. Tujuan Pembelajaran	80
B. Uraian Materi	80
1. Bahan Komposit	80
2. Jenis-jenis komposit	83
C. Latihan Soal	94
D. Daftar Pustaka	94
PERTEMUAN 8	95
BAHAN LOGAM	95
A. Tujuan Pembelajaran	95
B. Uraian Materi	95
1. Struktur kristal dan densitas teoritis.	95
2. Karakteristik listrik	98
C. Latihan Soal	107
D. Daftar Pustaka	108
PERTEMUAN 9	109
BAHAN KONDUKTOR	109
A. Tujuan Pembelajaran	109
B. Uraian Materi	109
1. Bahan Konduktor	109
2. Klasifikasi Bahan Konduktor	115
3. Krikteria Mutu Penghantar	119

C. Latihan Soal	120
D. Daftar Pustaka	120
PERTEMUAN 10	121
BAHAN MAGNETIK	121
A. Tujuan Pembelajaran	121
B. Uraian Materi	121
1. Bahan Magnetik	121
2. Diamagnetik, Paramagnetik, Feromagnetik, Ferimagnetik dan Antiferomagnetik.	125
3. Bahan Magnet Permanen	128
C. Latihan Soal	135
D. Daftar Pustaka	135
PERTEMUAN 11	136
KARAKTERISTIK KELISTRIKAN BAHAN MAGNETIK	136
A. Tujuan Pembelajaran	136
B. Uraian Materi	136
1. Bahan Magnetik	136
2. Bahan Magnet dan Sifat Listrik	139
3. Asal Mula Momen Magnet	143
C. Latihan Soal	147
D. Daftar Pustaka	147
PERTEMUAN 12	148
BAHAN SEMIKONDUKTOR	148
A. Tujuan Pembelajaran	148
B. Uraian Materi	148
1. Bahan Semikonduktor	148
2. Struktur Kristal	159
C. Latihan Soal	159

D. Daftar Pustaka	160
PERTEMUAN 13	161
KARAKTERISTIK KELISTRIKAN BAHAN SEMIKONDUKTOR	161
A. Tujuan Pembelajaran	161
B. Uraian Materi	161
1. Karakteristik Kelistrikan	161
2. Elektroda Semikonduktor	163
3. Efek Iradiasi Semikonduktor	166
4. Cacat Titik Semikonduktor dan Interaksinya	169
5. Cacat Annealing	170
C. Latihan Soal	172
D. Daftar Pustaka	172
PERTEMUAN 14	173
BAHAN SUPERKONDUKTOR	173
A. Tujuan Pembelajaran	173
B. Uraian Materi	173
1. Bahan Superkonduktor	173
2. Implementasi Bahan Superkonduktor	176
3. Superkonduktor Nb-Ti dan Nb ₃ Sn	180
4. Superkonduktor Copper-oxide	182
C. Latihan Soal	185
D. Daftar Pustaka	185
GLOSARIUM	187
DAFTAR PUSTAKA	189
RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER ¹	190
(RPS)	190

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Sistem Kristal	11
Tabel 2.1. Klasifikasi Ketahanan Bahan Isolasi Terhadap Panas	18
Tabel 3.1. Sifat Beberapa Isolator Cair	29
Tabel 4.1. Sifat Beberapa Gas	47
Tabel 5.1. Bobot Molekul	54
Tabel 5.2 Polimer Bersifat Konduktif	60
Tabel 6.1. Konstanta Dielektrik Bahan Keramik	68
Tabel 6.2 Klasifikasi Polusi	71
Tabel 8.1. Nilai Konduktivitas dan Resistivitas Logam	99
Tabel 9.1. Perbandingan Nilai Resistivitas Listrik Volum dan Konduktivitas Listrik dari Paduan Aluminium	108
Tabel 11.1. Perilaku Magnetik pada Bahan dengan Sifat Kemagnetan yang Berbeda	130
Tabel 11.2. Karakteristik dari Bahan Magnetik Kuat	131
Tabel 11.3 Unit Magnetik dan Faktor Konversi untuk SI, CGS dan Emu Sistem	135
Tabel 12.1. Energi Ionisasi	142
Tabel 12.2. Semikonduktor dan Penggunaannya	143
Tabel 14.1 Temperatur kritis (T_c) beberapa bahan superkonduktor	166
Tabel 14.2 Parameter Material Dasar dan Kerapatan Arus Kritis yang Relevan untuk Superkonduktor	170

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Struktur Kristalin	10
Gambar 3.1 Cara Kerja Cairan Isolasi	19
Gambar 4.1. Tegangan Tembus pada Medium Udara { $V_t = f$ (celah udara) pada $p = 1$ atm, $F = 50$ Hz}	20
Gambar 4.2. Ilustrasi Molekul SF_6	26
Gambar 6.1. Struktur $BaTiO_3$ (a) Bentuk Tiga Dimensi dan (b) dari Satu Sisi	36
Gambar 8.1. Unit Sel HCP dengan Parameter Kisi a dan c	47
Gambar 9.1. Skema Zona Brillouin	53
Gambar 9.2. Diagram Perbandingan Densitas, Resistivitas Listrik dan Konduktivitas Listrik dari Paduan Aluminium	55
Gambar 12.1. Celah Pita Energi pada Beberapa Bahan	66
Gambar 12.2. Kelompok Semikonduktor	67
Gambar 12.3. Penampang Lintang Sumur-n CMOS	69
Gambar 13.1. Skema Struktur Pita Energi Semikonduktor (a) Tipe-n, (b) Tipe-p.....	72
Gambar 14.1. Sifat Superkonduktor Beberapa Unsur pada Bidang Medan Magnet dan Temperatur	74

PERTEMUAN 1

STRUKTUR ATOM DAN MOLEKUL

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan 1, mahasiswa mampu menjelaskan definisi atom, model atom dan ikatan atom. Menjelaskan definisi molekul dan klasifikasi struktur kristal, dan menjelaskan klasifikasi bahan berdasarkan fasa dan sifat kelistrikannya.

B. Uraian Materi

1. Klasifikasi Bahan

Suatu bahan dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat fisis atau sifat kimianya. Pengelompokan bahan berdasarkan sifat fisis yang umum disampaikan adalah pengelompokan berdasarkan besarnya kekuatan ikatan molekul penyusun bahan. Dari pengelompokan ini dikenal tiga kelompok bahan, yaitu: padat, cair dan gas. Saat ini ada kelompok ke empat yang dikenal dengan plasma. Sedangkan, pengelompokan bahan menurut sifat kimianya dikenal dengan unsur, senyawa dan campuran. Berikut penjelasan untuk kelompok bahan tersebut.

a. Padat

Benda padat memiliki bentuk dan volum tetap dengan molekul-molekulnya berada pada posisi yang tetap. Kedudukan molekul yang tetap ini disebabkan oleh gaya listrik dan getaran molekulnya terjadi pada posisi kesetimbangan. Benda padat dapat dikelompokkan atas tiga klasifikasi dasar diantaranya keramik, polimer dan logam. Pengelompokkan ini didasari oleh komposisi struktur dan kimia atomnya. Kelompok lainnya ada komposit yang merupakan kombinasi dua atau lebih dari bahan klasifikasi dasar. Untuk bahan maju dapat diklasifikasikan menjadi semikonduktor, biomaterial, smart material dan rekayasa material nano.

1) Logam

Komponen pada bagian ini terdiri atas beberapa komponen logam seperti tembaga, nikel, emas, titanium dan aluminum, serta bisa juga

mengandung komponen selain logam dalam jumlah kecil seperti karbon, nitrogen dan oksigen. Atom dalam logam dan paduannya tersusun sangat baik dan bila dibandingkan dengan keramik dan polimer memiliki densitas yang lebih tinggi. Logam memiliki karakteristik mekanik yang kaku, kuat, daktail dan tahan terhadap fraktur, sehingga logam sangat luas digunakan sebagai bahan struktur. Logam memiliki jumlah elektron tidak terlokalisasi yang besar, dimana elektron ini tidak terikat pada atom tertentu. Elektron-elektron inilah yang mempengaruhi berbagai karakteristik logam. Sebagai contoh: logam sangat baik sebagai konduktor listrik dan panas, dan memiliki sifat optik yang tidak transparan terhadap cahaya tampak. Permukaan logam yang dipoles akan mengkilap. Beberapa logam seperti Fe, Co dan Ni memiliki sifat magnetik.

2) Keramik

Keramik terdiri atas unsur logam dan nonlogam; yang umumnya akan berupa oksida, nitrida dan karbida. Sebagai contoh keramik yang umum adalah silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), silikon karbida (SiC), dan silikon nitrida (Si_3N_4) dan bila mendengar keramik tentunya akan merujuk pada semen dan gelas yang mengandung mineral lempung seperti porselen. Sifat mekanik keramik relatif kaku dan kuat dimana kekakuan dan kekuatannya sebanding dengan logam. Namun keramik sangat rapuh (daktilitas rendah) dan suseptibilitas yang tinggi terhadap fraktur. Karakteristik keramik umumnya sebagai isolator panas dan aliran listrik, dan lebih kuat terhadap temperatur panas dan keadaan yang berbahaya bagi logam dan polimer. Karakteristik optik keramik bisa transparan, tembus cahaya atau buram. Beberapa keramik oksida ada yang menunjukkan karakteristik magnetik.

3) Polimer

Bahan yang merupakan bagian dari polimer adalah plastik dan karet. Kandungan polimer umumnya berupa organik yang dasar unsur kimianya adalah karbon, hidrogen dan unsur non logam seperti oksigen, nitrogen dan silikon. Polimer mempunyai susunan molekul yang cukup besar, dan umumnya mempunyai rantai karbon. Polimer yang umum dikenal seperti karet silikon, nylon, polystyrene (PS), polycarbonate (PC), poly (vinyl chloride) (PVC) dan polyethylene (PE). Polimer umumnya memiliki

densitas yang rendah. Karakteristik mekanik polimer berbeda dengan logam dan keramik. Polimer tidak kaku maupun kuat. Namun dengan densitas yang rendah kekakuan dan kekuatan per massa dasar dapat sebanding dengan logam dan keramik. Beberapa polimer sangat daktail dan lentur sehinggamudha dibentuk menjadi bentuk yang kompleks. Secara umum, polimer relatif tahan bahan kimia dan tidak reaktif terhadap lingkungan tertentu. Satu kelemahan polimer adalah kecenderungan melunak dan/atau terdekomposisi pada temperatur tertentu sehingga membatasi waktu penggunaannya. Sifat konduktifitas listriknya sangat rendah dan bersifat non magnetik.

4) Komposit

Komposit memiliki komponen yang terdiri atas dua bahkan lebih komponen dari klasifikasi dasar yang telah disebutkan diatas seperti polimer, logam dan keramik. Tujuan pembuatan komposit merupakan upaya untuk memperoleh perpaduan karakteristik yang tidak dimiliki oleh salah satu komponen dan akan memilih keistimewaan yang paling baik dari setiap komponen penyusun komposit. Ada beberapa bahan alami yang berupa komposit dari tulang dan kayu. Sebagai gambaran komposit yang ada disekitar kita seperti *fiberglass*.

5) Bahan Maju

Bahan yang dimanfaatkan dalam aplikasi teknologi tinggi dapat dikatakan sebaga bahan maju. Aplikasi teknologi tinggi yang dimaksud adalah perangkat atau produk yang beroperasi atau fungsinya menggunakan prinsip-prinsip yang mutakhir seperi perlengkapan elektronik (kamera digital dan pemutar CD/DVD), komputer, sistem fiber optik, pesawat angkasa luar dan roket militer. Bahan maju ini umumnya adalah bahan tradisional yang sifat-sifatnya telah ditingkatkan. Bahan maju dapat berupa logam, keramik maupun polimer yang harganya mahal. Bahan maju termasuk juga semikonduktor, biomaterial, dan bahan masa depan seperti smart material dan bahan rekayasa nano.

6) Semikonduktor

Bahan ini memiliki sifat listrik diantara konduktor dan isolator. Karakteristik listrik dari bahan ini sangat sesitif terhadap jumlah impuritas atom yang konsentrasinya dapat dikendalikan pada daerah tertentu yang sangat

kecil. Adanya bahan semikonduktor telah membuat penemuan rangkaian terintegrasi (IC) yang merevolusi dunia elektronik dan komputer.

7) Biomaterial

Bahan ini digunakan sebagai komponen yang diimplan pada tubuh manusia. Penggantian ini bertujuan menggantikan bagian tubuh yang mengalami sakit atau cacat. Bahan ini harus dapat diterima tubuh dan tidak bersifat racun. Bahan yang termasuk biomaterial dapat berupa logam, keramik, polimer dan semikonduktor.

8) *Smart Material*

Bahan ini adalah kelompok bahan yang mampu mendeteksi perubahan dilingkungannya dan melakukan respon yang sudah ditentukan terhadap perubahan tersebut. Komponen (sistem) dari smart material terdiri atas sensor dan aktuator. Aktuator dapat bekerja untuk melakukan perubahan bentuk, posisi, frekuensi alami ataupun karakteristik mekanik sebagai respon dari perubahan temperatur, intensitas cahaya, medan listrik dan/atau medan magnet.

9) Bahan Rekayasa Nano

Kelompok bahan ini adalah bahan-bahan yang direkayasa dari membangun atom-per-atom. Nano merupakan prefiks yang menyatakan ukuran dalam rentang nanometer (10^{-9} m). Contoh bahan ini adalah karbon nanotube.

b. Cair

Benda cair memiliki bentuk yang tidak tetap, dengan volum yang tetap. Bentuk cair pada benda dapat ditemukan pada temperatur yang lebih tinggi dari temperatur saat bentuk padat. Susunan molekulnya relatif lebih renggang, sehingga molekul-molekul dapat bergerak bebas dan secara acak.

c. Gas

Benda gas tidak memiliki bentuk dan volum yang tetap. Susunan molekulnya sangat renggang dimana molekul gas berinteraksi sangat lemah dengan molekul gas lainnya. Molekul gas dengan mudah untuk bergerak bebas. Bentuk gas suatu benda dapat ditemukan pada temperatur yang lebih tinggi dari temperatur saat bentuk cair.

d. Plasma

Plasma merupakan kelompok bahan yang serupa dengan gas dimana tidak memiliki bentuk dan mengikuti bentuk wadahnya. Perbedaan yang mendasar

dengan gas adalah karakteristiknya yang dapat dipengaruhi oleh medan elektromagnetik. Plasma dapat dikatakan juga sebagai gas yang mengalami ionisasi. Plasma terbentuk dari bahan yang dipanaskan dengan temperatur yang sangat tinggi sehingga membuat electron menjadi lepas dari ikatan inti atomnya.

Untuk pengelompokan bahan menurut sifat kimianya dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Unsur

Unsur merupakan zat terkecil yang menyusun bahan. Unsur tidak dapat diuraikan menjadi lebih sederhana dengan reaksi kimia sederhana. Unsur dapat disebut juga dengan nama atom.

b. Senyawa

Senyawa merupakan zat yang terdiri atas gabungan satu atau lebih unsur yang sama ataupun berbeda. Senyawa dapat diuraikan dengan reaksi kimia biasa sehingga diperoleh zat lain yang lebih sederhana.

c. Campuran

Kelompok bahan ini merupakan gabungan dua atau lebih zat dimana komposisinya tidak selalu tetap. Syarat lainnya dari campuran adalah masih memiliki sifat dasar dari tiap-tiap zat dalam campurannya. Campuran dapat dibedakan menjadi dua lagi yaitu, homogen dan heterogen. Campuran homogen, secara fisik dua zat atau lebih yang saling bercampur tidak bisa diidentifikasi kembali, akan tetapi sifat setiap komponen penyusunnya masih terlihat. Sedangkan, campuran heterogen secara fisik dua zat atau lebih yang saling bercampur masih dapat dibedakan.

2. Atom, Model Atom, Struktur Atom dan Ikatan Atom

Pada bagian ini akan disampaikan unsur/atom sebagai penyusun bahan dan ikatan yang muncul pada atom.

a. Atom

Seperti sudah disinggung pada bagian klasifikasi bahan, unsur/atom merupakan zat terkecil penyusun bahan. Setiap bahan disusun oleh atom-atom, sedangkan atom terdiri atas inti atom dan elektron. Di dalam inti atom terdapat proton dan neutron. Proton dan elektron memiliki kandungan listrik yang nilainya $1,60 \times 10^{-19}$ C, dimana bernilai positif untuk proton dan negatif

untuk elektron, sedangkan neutron tidak memiliki muatan listrik. Massa dari partikel tersebut sangat kecil, neutron dan proton memiliki massa yang saling mendekati sebesar $1,67 \times 10^{-27}$ kg yang bernilai lebih besar dibandingkan elektron yang massanya sebesar $9,11 \times 10^{-31}$ kg. Setiap komposisi kimia dikarakteristikan menggunakan akumulasi proton pada inti atom yang disebut nomor atom (Z). Pada atom yang kelistrikkannya lengkap atau netral, nomor atom ini sama juga dengan akumulasi elektronnya. Jumlah proton dan neutron dalam inti atom disebut dengan nomor massa (A). Apabila pada satu unsur memiliki nomor massa yang berbeda dikenal sebagai isotop. Pada isotop jumlah proton sama tetapi jumlah neutron (N) yang berbeda. Tabel periodik merupakan representatif unsur-unsur yang telah diketahui, disusun berdasarkan nomor atom dan konfigurasi elektron ke dalam beberapa golongan. Bobot atom sebuah unsur merupakan rerata dari massa atom isotop yang ada di alam. Satuan yang digunakan untuk menghitung berat atom adalah satuan massa atom (atomic mass unit = amu). Bobot atom sebuah elemen atau bobot molekul sebuah campuran diidentifikasi dari amu per atom (atau molekul) atau massa per mol dari komponen. Sebuah mol bahan terdiri atas $6,0221 \times 10^{23}$ atom atau molekul, nilai ini dikenal sebagai bilangan Avogadro. Oleh karena itu, $1 \text{ amu/atom (atau molekul)} = 1 \text{ g/mol}$. Sebagai gambaran unsur karbon (C) memiliki nomor massa 12 dengan nomor atom 6. Dari informasi ini, jumlah elektron dan proton karbon sebanyak 6 dan jumlah neutronnya sebanyak 6 yang diperoleh dari pengurangan nomor massa dikurangi dengan nomor atom. Bagaimana untuk struktur elektronnya. Jumlah kulit elektronnya sebanyak dua yaitu kulit K (2 elektron) dan L (4 elektron). Sedangkan, untuk konfigurasi elektronnya adalah $1s^2 2s^2 2p^2$ atau dapat ditulis juga menjadi $[\text{He}] 2s^2 2p^2$.

b. Model Atom

Prinsip dan hukum-hukum dari fenomena yang melibatkan elektron dalam benda padat yang tidak dapat dijelaskan melalui mekanika klasik mengenai sistem atomik dan subatomik diidentifikasi sebagai mekanika kuantum. Pengetahuan sifat elektron pada atom dan benda padat kristalin memerlukan konsep-konsep dari mekanika kuantum. Model yang lebih sederhana adalah model atom Bohr. Model ini mengasumsikan elektron berputar mengelilingi inti atom dalam orbit tertentu dan elektron menempati posisi yang tertentu dalam orbit. Model atom Bohr memiliki keterbatasan

dimana model ini tidak dapat menjelaskan beberapa fenomena yang melibatkan elektron. Untuk menyelesaikan hal tersebut dikembangkan model mekanika gelombang dimana elektron dianggap memiliki karakteristik seperti gelombang dan seperti partikel. Model ini tidak memperlakukan elektron sebagai partikel yang bergerak pada orbit tertentu; lebih dianggap posisi elektron sebagai peluang sebuah elektron berada pada berbagai posisi disekitar inti atom.

c. Struktur Atom

Perlu dipahami bahwa atom terdiri dari partikel-partikel dengan ukuran yang sangat kecil namun dapat berdiri sendiri, jika atom-atom digabungkan maka dapat membentuk partikel dengan ukuran sedikit lebih besar dari ukuran atom sebelumnya yang disebut dengan molekul. Dalam suatu unsur kimia, didalamnya terdapat lebih dari 100 unsur dengan masing-masing jenis atom tersendiri, sebagian besar unsur tersebut adalah logam (besi, tembaga dan aluminium), sebagai contoh sepotong tembaga berasal dari susunan atom tembaga yang terdiri dari jutaan atom. Unsur lainnya juga merupakan gas (oksigen dan hidrogen).

Terdapat dua unsur kimia yang merupakan zat cair pada suhu biasa, unsur tersebut adalah logam raksa (merkuri) yang berwujud cair dan berwarna perak serta cairan bromin yang mengandung racun dan berwarna cokelat kemerahan. Ketika atom-atom dari unsur yang berbeda digabungkan, maka ciri-ciri unsur pembentukannya akan menjadi sangat berbeda. Contohnya apabila logam tembaga digabungkan dengan gas oksigen maka keduanya akan membentuk molekul nonlogam tembaga oksida, contoh lainnya adalah apabila gas hidrogen dan oksigen digabungkan maka akan menjadi zat cair yaitu air.

d. Ikatan Atom

Memahami sifat-sifat fisik suatu bahan dapat diprediksikan melalui pengetahuan terhadap gaya interatomik yang mengikat atomnya. Ikatan atom dibagi atas tiga ikatan utama atau dikenal sebagai ikatan kimia dan dua ikatan sekunder atau ikatan fisika. Ikatan primer yang ditemukan dalam benda padat yaitu ionik, kovalen dan logam, sedangkan ikatan sekunder yaitu hidrogen dan van der Waals.

1) Ikatan Ionik

Merupakan ikatan yang timbul pada campuran yang terdiri atas unsur logam dan non logam, sebagai contoh NaCl. Unsur logam akan dengan mudah memberikan elektronnya ke unsur nonlogam. Bahan yang memiliki ikatan ionik memiliki karakteristik keras dan rapuh, bersifat insulasi terhadap panas dan listrik.

2) Ikatan Kovalen

Ikatan ini diasumsikan adanya elektron yang berbagi antara atom yang saling terikat. Dua atom yang terikat dengan ikatan kovalen, diasumsikan atom penyusun tersebut akan memberikan minimal satu elektron kepada ikatannya dan berbagi electron, yang akan dianggap berasal dari kedua atom, sebagai contoh CH₄. Bahan yang memiliki ikatan kovalen dapat memiliki karakteristik keras, kuat dan temperatur leleh yang tinggi, namun dapat juga sangat lemah dan temperatur leleh yang rendah. Desain bahan yang memiliki sebagian ikatan ionik dan sebagian ikatan kovalen dapat dilakukan. Hal ini dapat dilakukan dengan menggabungkan unsur-unsur dengan perbedaan nilai keelektronegativitasan Pauling yang besar. Persentase karakteristik ionik antara ikatan unsur A dan B dapat ditentukan dengan

$$\% \text{ionik} = \{1 - \exp[-(0,25)(X_A - X_B)^2]\} \times 100 \quad (1.1)$$

Dimana X_A dan X_B adalah nilai keelektronegativitasan Pauling unsur A dan B.

Sebagai contoh SiC (silikon karbida), unsur Si memiliki nilai elektronegativitas Pauling sebesar 1,90 dan untuk C sebesar 2,55. Dari persamaan di atas dapat diselesaikan sebagai berikut:

$$X_{\text{Si}} = 1,90$$

$$X_{\text{C}} = 2,55$$

$$\begin{aligned} \% \text{Ionik} &= \{1 - \exp[-(0,25)(X_{\text{Si}} - X_{\text{C}})^2]\} \times 100 \\ &= \{1 - \exp[-(0,25)(1,90 - 2,55)^2]\} \times 100 \\ &= \{1 - \exp[-(0,25)(-0,65)^2]\} \times 100 \\ &= \{1 - \exp[-(0,25)(0,42)]\} \times 100 \\ &= \{1 - \exp[-(0,11)]\} \times 100 \\ &= \{1 - 0,89\} \times 100 \end{aligned}$$

$$= 0,11 \times 100$$

$$\% \text{Ionik} = 11 \%$$

Jadi, SiC memiliki 11 %ionik dan 89 %kovalen.

3) Ikatan Logam

Ikatan ini dapat diamati pada paduan dan logamnya. Bahan logam mempunyai beberapa elektron valensi. Salah satu sampel untuk menggambarkan ikatan logam menyatakan bahwa elektron valensi dalam benda padat tidak terikat pada atom spesifik dan lebih leluasa untuk berpindah di dalam keseluruhan logam. Elektron dalam logam lebih membentuk awan elektron. Elektron yang bukan valensi serta inti atom diberi nama inti ion, yang mempunyai muatan total positif yang sebanding dengan besar jumlah muatan elektron valensi pada tiap atom.

4) Ikatan Van der Waals

Ikatan ini merupakan ikatan fisika atau sekunder. Ikatan ini lebih lemah dibandingkan dengan ikatan primer. Ikatan sekunder muncul diseluruh atom atau molekul namun keberadaannya tidak terdeteksi bila muncul salah satu ikatan primer. Ikatan sekunder merupakan bukti pada gas inert, yang memiliki susunan elektron yang stabil. Ikatan ini terbentuk karena ada ketidakseimbangan distribusi muatan, yang disebut dengan dipol. Dipol ini dapat terjadi oleh fluktuasi acak oleh elektron yang umumnya memiliki kesimetrisan medan listrik dalam atom.

5) Ikatan Hidrogen

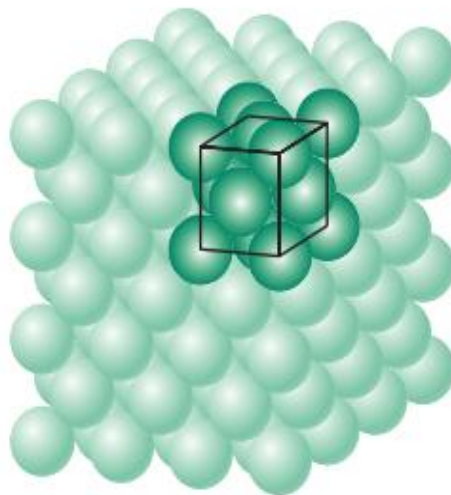
Ikatan hidrogen adalah jenis ikatan khusus yang ditemukan dan muncul antara satu atau lebih molekul yang mempunyai hidrogen sebagai salah satu molekul yang membentuknya. Ikatan hidrogen terjadi yang pada HF, H₂O dan NH₃ adalah ikatan antar molekulnya, dimana ikatan H - O, H - N atau H - F adalah ikatan kovalen dan satu elektron dari atom H berbagi dengan atom lain di molekul lainnya.

e. Molekul dan Struktur Kristal Pada Bahan

Ketika pertama kali mendengar kata kristal maka kemungkinan besar yang terbayang adalah sesuatu yang berkilauan, bening dan memiliki banyak sudut. Kebanyakan logam tersusun dari kristal, ikatan antarpartikel yang terdapat dalam kristal dapat menjelaskan sebagian besar sifat logam. Logam dapat dipotong atau digosok untuk mendapatkan permukaan yang mengkilap, bahkan cermin dapat dibuat dari logam yang digosok sedemikian rupa.

Banyak logam yang dapat diulur sampai membentuk lapisan yang sangat tipis untuk membuat kawat, sifat tersebut disebut dengan kemuluran (*ductility*). Logam juga dapat ditempa menjadi lempengan tipis sampai dapat ditembus oleh cahaya, sifat tersebut disebut dengan ketertempaan (*malleability*).

Benda padat diklasifikasikan berdasarkan keteraturan susunan atom atau ionnya satu dengan lainnya. Bahan kristalin memiliki keteraturan atau keberulangan atom-atomnya pada rentang yang panjang dalam arah tiga dimensi dimana setiap atom terikat dengan atom terdekatnya seperti pada Gambar 1.1. Semua logam, sebagian keramik dan polimer tertentu membentuk struktur kristalin dalam kondisi solidifikasi normal. Untuk bahan yang bukan kristalin, tidak terlihat susunan atom pada rentang yang tinggi. Bahan ini dapat dikatakan sebagai bahan amorf atau nano kristalin.



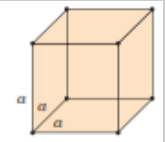
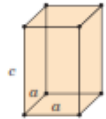
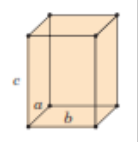
Gambar 1.1 Struktur Kristalin.

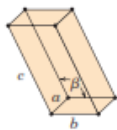
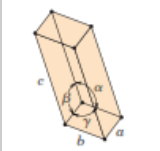
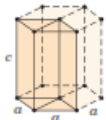
Kristal mineral alam mempunyai bentuk, warna dan ukuran yang berbeda-beda, pada dasarnya terdapat tujuh bentuk kristal yang namanya didasarkan pada bentuk geometri kristal tersebut. Bentuk kristal yang sangat sederhana adalah kubus, contoh bentuk kristal kubus dapat dilihat pada bentuk garam dapur yang terbentuk secara alami sebagai batu garam mineral yang dikenal sebagai halit, jika diamati menggunakan kaca pembesar yang mumpuni maka dapat dilihat bentuk kristal berupa kubus pada garam dapur. Sistem kristal yang berbeda-beda dapat dijelaskan dengan sumbu khayal

yang tergambarkan didalamnya, enam dari tujuh bentuk kristal mempunyai tiga sumbu sejajar yang saling tegak lurus. Susunan dasar atom atau ion yang terdapat dalam kristal disebut sebagai sel satuan, hal tersebut akan menentukan bagaimana bentuk luar sebuah kristal.

Beberapa sifat kristalin bahan padat bergantung pada struktur kristalnya, dimana atom, ion atau molekul tersusun secara spasial. Untuk menggambarkan struktur kristal, atom atau ion digunakan bentuk bola yang dapat ditentukan diameternya. Model seperti ini disebut “atomic hard-sphere” dimana bola-bola digambarkan menyentuh atom tetangga terdekatnya, seperti tergambarkan pada Gambar 1.1. Ruang susunan tiga dimensi yang berulang dimana atom-atom menempati posisi pada titik tertentu disebut kisi. Dalam menggambarkan struktur kristal sering membagi struktur menjadi bagian yang sangat kecil dan merupakan entiti terkecil berulangnya. Entiti ini dikenal sebagai sel unit. Periodisitas dari sistem kristal dapat dipahami dalam berbagai geometri sel unit yang berbeda. Sistem kristal dibagi menjadi tujuh, yang kemudian terbagi menjadi 14 kisi Bravais, yang kemudian terbagi menjadi 230 grup ruang. Pada Tabel 1.1 disajikan tujuh sistem kristal yang telah dikenal.

Tabel 1.1. Sistem Kristal

Sistem	Sumbu	Sudut Sumbu	
Kubik	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Ortorhombik	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	

Monoklinik	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triklinik	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	
Heksagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ ; \gamma = 120^\circ$	
Rhombohedral	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

Partikel-partikel yang ada dalam sebuah kristal yang tersusun dalam pola teratur yang disebut dengan kekisi kristal, hal ini berlaku untuk beberapa bentuk kristal lainnya. Jika digambarkan pada bentuk kristal kubus, terdapat delapan molekul pada setiap sudut/pojok sebuah kubus, terdapat juga ruang di tengah untuk molekul lainnya, susunan tersebut adalah kekisi kristal yang dikenal sebagai kubus yang berpusat pada tubuh, sedangkan dalam susunan lain terdapat molekul tambahan pada pusat dalam setiap sisi kubus, pola tersebut adalah kubus yang berpusat pada sisinya. Bisa juga dalam susunan lain terdapat sebuah lingkaran enam molekul dengan molekul ketujuh ada pada posisi tengah.

C. Latihan Soal

1. Tentukan kelompok manakah tiap-tiap bahan berikut, apakah kelompok logam, keramik atau polimer dan jelaskan!
 - a. Kuningan
 - b. MgO
 - c. Besi
 - d. B_4C

- e. Polycholoprene
- 2. Tentukan dan jelaskan ikatan atom pada xenon padat, tembaga dan karet!
- 3. Hitunglah persentase ionik dari campuran berikut:
 - a. MgO
 - b. CdS
 - c. B₄C
 - d. Al₂O₃
- 4. Jelaskan perbedaan struktur atom dengan struktur kristal?
- 5. Berikan informasi mengenai nama unsur, nomor atom, nomor massa, struktur elektron dan struktur kristal dari
 - a. Zr
 - b. Fe
 - c. Cr
 - d. Si
 - e. K

D. Daftar Pustaka

- Dekker, A. J. (1959). Electrical engineering materials. Prentice Hall.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: (Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Clark, O. E. J. (2019). Atom dan Molekul. Alih bahasa: (Andri S., Didik H.P., Rachmad I., Rizka Y., Wulandari), Bandung, Pakar Raya.

PERTEMUAN 2

BAHAN ISOLASI PADAT

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah menyelesaikan mempelajari materi dalam pembahasan ini, mahasiswa memiliki kemampuan untuk menjelaskan dan memahami jenis beserta karakteristik kelistrikan bahan isolasi padat. Menjelaskan resistivitas, permitivitas dan dielektrik loss.

B. Uraian Materi

1. Bahan Isolasi

Isolator listrik merupakan bahan yang tidak mengalirkan arus listrik. Bahan isolasi memiliki lebar pita antara valensi dengan konduksi yang sangat besar, sehingga untuk mengeksitasi elektron memerlukan energi yang sangat besar. Bahan-bahan seperti ini yang digunakan dalam peralatan elektronika untuk menghambat mengalirnya arus listrik. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dari bahan isolator, yaitu:

- Sifat kelistrikan isolator, meski telah diketahui memiliki karakteristik yang tidak menghantarkan arus listrik, bahan isolator memiliki batas kelistrikan tertentu yang dapat menyebabkan kegagalan sifat isolasinya. Sifat isolasi suatu bahan terbagi atas ketahanan isolasi dan kekuatan dielektrik. Resistivitas isolasi dapat dibagi menjadi resistivitas volum dengan satuan ($\Omega \cdot m$) dan resistivitas permukaan (Ω).

Karakteristik resistivitas volum maupun permukaan akan cenderung menurun besarnya bila temperatur meningkat. Untuk bahan isolasi yang higroskopis, nilai resistivitasnya akan menurun ketika kelembaban meningkat. Kemudian nilai resistivitas akan menurun bila tegangan yang diberikan meningkat.

$$R_v = \rho_v \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

R_v adalah hambatan volum (Ω), ρ_v adalah resistivitas volum ($\Omega \cdot m$), L adalah panjang bahan yang dialiri arus listrik (m) dan A adalah luas penampang dari bahan (m^2)

$$R_s = \rho_s \frac{a}{b} \quad (2.2)$$

R_s adalah hambatan permukaan antara dua bidang yang terpisah (Ω), ρ_s adalah resistivitas permukaan (Ω), a adalah jarak antar bidang (m) dan b adalah lebar bidang (m). Bahan isolasi memiliki nilai konduktivitas listrik berkisar pada orde 10^{-10} hingga 10^{-20} ($\Omega \cdot m$)⁻¹. Secara intrinsik nilai resistivitas listrik dipengaruhi oleh resistivitas listrik temperatur, impurities dan deformasi. Resistivitas listrik yang dipengaruhi oleh parameter tersebut dikenal sebagai aturan Matthiessen yang dituliskan sebagai berikut:

$$\rho_{total} = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (2.3)$$

Dimana ρ_t , ρ_i dan ρ_d adalah resistivitas listrik temperatur, impurities dan deformasi. Dari ketiga parameter tersebut, parameter temperatur yang memberikan pengaruh terbesar. Temperatur mempengaruhi resistivitas listrik dituliskan sebagai berikut:

$$\rho_t = \rho_0 + aT \quad (2.4)$$

Dimana ρ_0 adalah resistivitas listrik bahan pada temperatur kamar dan a adalah konstanta perubahan resistivitas listrik yang dipengaruhi temperatur.

Bahan dielektrik merupakan bahan isolator listrik dan dapat dikutubkan sehingga terjadi pemisahan muatan positif dan negatif dalam tingkat atom atau molekul. Ukuran untuk menyatakan karakteristik dielektrik pada isolator adalah konstanta dielektrik. Penyebutan dielektrik dipergunakan pada komponen isolator yang mempunyai tingkatan pengkutuban tinggi yang besarnya diwakilkan dengan konstanta dielektrik.

Frekuensi merupakan parameter yang penting dalam aplikasi dielektrik, dan bergantung mekanisme polarisasinya. Bahan yang mekanismenya pada dipol elektronik dan ion akan merespon pada frekuensi $10^{13} - 10^{16}$ Hz namun polarisasi molekul pada bahan padat yang memerlukan sekelompok atom responnya relatif lebih lambat. Selain itu frekuensi sangat peka terhadap temperatur. Bahan keramik dan polimer digunakan sebagai isolator dan atau dalam kapasitor. Seperti gelas, porselin, steatite dan mika memiliki nilai konstanta dielektrik berkisar 6 hingga 10. Bahan ini menunjukkan stabilitas dimensi dan kekuatan mekanik pada derajat yang tinggi. Titania (TiO_2) dan

keramik titanate dapat direkayasa hingga memiliki nilai konstanta dielektrik yang tinggi, sehingga dapat digunakan dalam kapasitor. Nilai dari konstanta dielektrik polimer lebih rendah dibanding keramik. Hal ini disebabkan momen dipole dari polimer berkisar antara 2 dan 5. Bahan ini umumnya digunakan sebagai bahan isolasi.

- b. Sifat mekanik isolator juga merupakan hal sangat penting untuk dijadikan pertimbangan terutama penyesuaian untuk aplikasinya. Karakter mekanis komponen isolasi merupakan kapasitas komponen dalam memegang bobot geser, tarik dan tekan. Karakter kekerasan komponen isolasi merupakan data tahan komponen dari tumbukan dan goresan.
- c. Secara umum komponen isolator harus memiliki sifat mekanik yang baik seperti tahan abrasi, sobek, benturan, regangan dan tegangan serta mampu dicetak.
- d. Sifat termal isolator yang perlu diperhatikan adalah karaktersitik dari titik lebur, flash point, konduktivitas panas, dan pemuaian panas. Karakteristik ini akan sangat mempengaruhi penggunaan isolator tersebut. Berdasarkan temperatur maksimum yang diijinkan, penyekat listrik dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelas yaitu:

1) Y

Bahan isolator kelas ini adalah bahan yang mengandung serat organik. Kelompok bahan ini antara lain katun, karton, sutera, dan kertas. Bahan ini tidak diberi pelapis pernis atau lainnya. Selain itu polimer termoplastik juga dikategorikan pada kelas ini. Maksimum temperatur penggunaan adalah 90°C . Klasifikasi yang bisa dikelompokkan pada kelas Y diantaranya kayu, polietilin, sutera alam, polivinil, katun, prespan, rayon, wol sintetis, kertas, poliakrit, karet dan serat poliamid.

2) A

Bila bahan serat organik dari kelas Y diberi pelapis pernis akan meningkatkan ketahanannya pada temperatur yang lebih tinggi. Maksimum temperatur penggunaan adalah 150°C . Klasifikasi yang bisa dikelompokkan pada kategori A merupakan komonen yang mengandung serat dari golongan Y yang sebelumnya dimasukan kedalam minyak trafo, aspal, vernis, email yang disatukan dengan poliamid dan vernis.

3) E

Bahan untuk kelas ini diantaranya adalah bahan isolator kawat enamel yang memakai bahan pengikat. Jenis bahan pengikat yang digunakan antara lain: polyvinylforma, damar epoxy dan polyurethane. Bahan seperti selulosa tekstolit, pertinaks dan film triacetate juga digunakan sebagai bahan pengikat. Maksimum temperatur penggunaan adalah 120° C. Klasifikasi yang bisa dikelompokkan kedalam kelas E ialah pembatas kawat email yang menggunakan komponen pengikat poli urethan, damar epoksi, polivinil formal dan bahan pengikat lainnya yang sejenis seperti komponen filem serat polietilin tereftalat, pengisi selulose, film triasetat, pertinaks dan tekstolit.

4) B

Komponen benyekat kelas ini bukan berupa organik. Bahan tersebut dilapisi atau direkatkan menjadi satu dengan pernis atau compound. Bahan ini memiliki ketahanan terhadap panas. Maksimum temperatur penggunaan adalah 13° C. Klasifikasi yang bisa dikategorikan kedalam kelas B merupakan komponen nonorganik (asbes, mika, fiber dan gelas) dimasukan atau ditempelkan menjadi satu dengan sirlak atau, bitumen, konpon, bakelit, pernis dan sebagainya.

5) F

Bahan kelas ini bukan bahan organik yang direkatkan dan digabungkan dengan bahan lain seperti polyurethane atau pernis yang tahan terhadap panas tinggi. Maksimum temperatur penggunaan adalah 155° C. Klasifikasi yang bisa dikategorikan kedalam kelas F merupakan komponen non organik dimasukan atau ditempelkan menjadi satu dengan poliurethan, epoksi, atau vernis yang kuat terhadap panas ekstrim.

6) H

Komponen kelas H ini merupakan bahan dengan dasar mika, gelas fiber dan asbes. Bahan kelas H tidak mengandung bahan yang organik sehingga temperatur penggunaannya dapat lebih tinggi. Maksimum temperatur penggunaan adalah 180° C. Klasifikasi yang bisa dikategorikan kedalam kelas H merupakan seluruh komponen komposisi yang menggunakan komponen dasar gelas, mika dan asbes fiber yang dimasukan kedalam silikon dan tidak dicampurkan komponen berserat

(katun, kertas dan lainnya). Pada kelas ini termasuk juga email kawat poliamid murni dan karet silikon.

7) C

Komponen kelas C juga bukan bahan organik dan tidak dilapisi. Bahan kelas ini antara lain: mika, mikanit, mikalek, gelas dan bahan keramik. Bahan isolator kelas ini dapat digunakan pada temperatur lebih dari 180° C. Untuk bahan organik yang digolongkan pada kelas C adalah Teflon (polytetradluoroethylene) dan dapat digunakan pada temperatur lebih dari 90° C. Klasifikasi yang bisa dikelompokkan kedalam kelas C seperti komponen anorganik yang tidak dimasukan serta tidak diikat menggunakan substansi organik, seperti contoh mikanit, mika yang anti panas (memakai komponen pengikat anorganik), gelas, bahan keramik dan mikaleks. Cuma satu komponen organik saja yang masuk dalam kelas C seperti polietra flouroetilin (teflon).

- e. Sifat komponen isolasi kepada panas merupakan kekuatan bahan dalam mengelola panas untuk kemudian dihasilkan resistansi panas yang dapat diklasifikasikan, hal tersebut dapat dilihat seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Klasifikasi Ketahanan Bahan Isolasi Terhadap Panas

Kelas	Bahan isolasi	Temperatur Kerja Maksimum
Y	Wool, katun, kertas, sutra, karet, rayon, kayu, poly amid, poly ethylene, polyvinyl	90° C
A	Bahan kelas Y diimpregnasi vernis, minyak. Email dicampur polyamid dan vernis	105° C
E	Kawat email	120° C
B	Bahan anorganik : fiber glas, mika, asbes	130° C
F	Bahan anorganik diimpregnasi polyuretan, epoxy	155° C

H	Fiberglas, mika, asbes diimpregnasi silicon resin	180° C
C	Bahan anorganik tidak diimpregnasi bahan organic : kaca, quartz, porselen	Lebih dari 180° C

- f. Sifat Kimia isolator antara lain, ketahanan terhadap kimia eksternal, kelarutan, penuaan, sifat higroskopis dan perubahan kimia dalam bahan isolator itu sendiri. Ketahanan kimia seperti kehadiran gas, asam, air, alkali dan garam mempengaruhi isolator yang berbeda dengan cara yang berbeda. Secara kimiawi suatu bahan adalah isolator yang lebih baik jika ini menolak aksi kimia. Higroskopisitas terjadi apabila beberapa isolator bersentuhan dengan atmosfer selama pembuatan atau operasi atau keduanya. Kelembaban mempengaruhi sifat listrik isolator. Pengaruh kontak dengan bahan lain apabila isolasi tetap bersentuhan dengan berbagai jenis bahan seperti udara, uap air, gas, bahan struktural dan bahan konduktor. Ini dapat mempengaruhi sifat isolasi. Penuaan adalah efek lama dari panas, aksi kimia, dan aplikasi tegangan. Faktor-faktor ini menentukan kehidupan alami isolator.
- g. Sifat fisis isolator merupakan sebuah sifat dengan kemampuan larut, resistansi kimia, higroskopis, permeabilitas uap, tropis dan radiasi. Sifat fisis pada benda padat memiliki bentuk yang tetap (bentuk sendiri), yang mana apabila berada pada suhu yang tetap maka benda padat akan memiliki isi yang tetap juga. Isi juga dapat bertambah atau memuai apabila mengalami kenaikan suhu serta sebaliknya benda dapat mengalami penyusutan apabila suhu menurun. Dikarenakan berat benda yang tetap, maka kepadatan benda dapat bertambah juga, berdasarkan penjelasan tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa apabila isi (volume) bertambah (memuai), maka kepadatannya dapat berkurang apabila isinya berkurang (menyusut), maka kepadatan dapat bertambah. Sehingga benda lebih padat dalam keadaan yang dingin dibandingkan dalam keadaan yang panas.
- h. Bahan pelarut komposisinya sama dengan bahan yang dilarutkan. Sifat kemampuan larut dibutuhkan apabila ingin menentukan jenis bahan pelarut untuk sebuah bahan, sebagai contohnya vernis, plastik dan lain sebagainya. Serta ketika melakukan pengujian bahan isolasi terhadap kemampuannya agar dapat tetap bertahan didalam cairan selama proses diimpregnasi dan

selama penggunaannya (bahan isolasi trafo minyak). Kemampuan larut pada bahan padat dapat dievaluasi berdasarkan seberapa banyaknya bagian dari permukaan bahan yang dapat larut setiap satuan waktu jika diberikan bahan pelarut. Kemampuan larut sebuah bahan dapat lebih besar apabila suhunya dinaikkan. Pada umumnya untuk komposisi kimia bahan pelarut sama dengan bahan yang akan dilarutkan, sebagai contoh hidro karbon (parafin, karet alam) dapat dilarutkan dengan menggunakan cairan hidro karbon atau phenol formaldehida. Pelarut dielektrik mengandung bahan dielektrik yang mencegah arus listrik mengalir melalui aliran pelarut kembali ke wadah pelarut dan pekerja yang menahannya. Jika pelarut tidak mengandung bahan dielektrik, aliran pelarut dapat berfungsi sebagai konduktor listrik yang memungkinkan pekerja tersengat parah dan membuat botol semprot meledak. Jika cairan dalam botol menyala, keseriusan situasinya bisa menjadi lebih buruk secara eksponensial.

- i. Bahan kimia seperti asam, basa atau garam dapat menurunkan resistansi bahan isolasi, sebagai contoh bahan anorganik tahan ozonisasi. Bahan isolasi memiliki kemampuan yang berbeda tingkat ketahanannya terhadap korosi yang dapat disebabkan oleh beberapa bahan kimia seperti gas, asam, air, basa dan garam. Penjelasan tersebut harus diperhatikan untuk pengambilan keputusan memakai bahan isolasi yang akan digunakan pada daerah yang mempunyai konsentrasi kimia aktif serta suhu diatas normal. Hal tersebut disebabkan karena kecepatan korosi dapat dipengaruhi juga oleh kenaikan suhu. Bahan isolasi yang akan dipergunakan pada instalasi tegangan tinggi harus dapat menahan terjadinya ozon. Dengan kata lain, bahan tersebut harus memiliki resistansi ozon yang tinggi dikarenakan ozon dapat mengakibatkan isolasi berubah menjadi regas. Dalam proses implementasinya bahan isolasi anorganik mempunyai daya tahan yang baik terhadap ozon.
- j. Higroskopis atau sifat penyerapan uap air yang terdapat pada area sekeliling bahan isolasi positif dapat menyebabkan kerusakan. Bahan hidroksil higroskopisnya relatif tinggi, sedangkan paraffin, polyethelene bersifat non higroskopis. Ada beberapa bahan isolasi ternyata memiliki sifat higroskopisitas. Uap air pada dasarnya bisa mengakibatkan perubahan mekanis fisik serta dapat memperkecil daya isolasi. Oleh karena itu agar tidak terjadi penyerapan uap air oleh bahan isolasi pada saat proses penyimpanan

atau pemakaian bahan isolasi berlangsung, maka seharusnya bahan penyerap uap air seperti senyawa P_2O_5 atau $CaCl_2$ harus mendapat perhatian dan dikelola dengan benar penggunaannya. Bahan dielektrik yang melekulnya berisikan kelompok hidroksil (OH), higroskopisitasnya relative besar. Sedangkan bahan dielektrik seperti 45 parafin, polietilin dan politetra fluoro etilen merupakan bahan-bahan nonhigroskopis. Contoh zat higroskopis diantaranya Garam dapur (natrium klorida), natrium hidroksida, potasium hidroksida, asam belerang, gula merah, etanol, metanol, gula, karamel, gliserin, pupuk, kertas, wol, kapas, nilon, poli (metil metakrilat) dan silika gel. Beberapa zat higroskopis (seperti garam dan alkohol) larut dalam air, sementara yang lain tidak (seperti nilon dan silika gel). Selain polaritas, ada tiga proses utama seperti penyerapan, penyerapan adalah ketika suatu zat memasuki tubuh suatu material. Misalnya kapas menyerap air. Adsorpsi: adsorpsi adalah ketika molekul menempel atau menempel pada permukaan. Misalnya, air menyerap ke Plexiglas. Aksi kapiler: aksi kapiler menarik air melalui pori-pori dan ruang sempit karena sifat perekat dan kohesif air. Manik-manik silika gel bersifat higroskopis karena silika menarik air, sementara pori-pori kecil dan ketidakaturan mengumpulkannya melalui aksi kapiler.

- k. Kemampuan bahan isolasi dilewati uap disebut sifat permeabilitas uap. Permeabilitas udara juga merupakan properti isolator termal yang sangat penting. Bahan ini harus menjadi bahan di mana udara dapat mengalir melalui pori-pori Anda. Isolator termal yang baik memiliki permeabilitas tinggi terhadap udara, karena ini adalah zat isolasi itu sendiri. Permeabilitas ini harus tidak memungkinkan masuknya uap atau uap air, sehingga dapat menghindari atau meminimalkan kondensasi cairan atau korosi material. Isolator termal terbaik memiliki permeabilitas yang sangat rendah terhadap uap dan kelembaban.
- l. Bahan isolasi harus memiliki daya tahan yang baik terhadap bahan cair seperti air, pelarut dan bahan kimia, daya tahan tersebut harus bersifat tahan lama dan tidak kehilangan efisiensi pada waktu yang relatif singkat. Selain itu bahan isolasi juga harus memiliki kriteria seperti mudah dipasang, tahan panas atau tidak mudah terbakar, tidak menyerap bau disekitarnya serta tidak menarik jamur atau kutu.
- m. Pengaruh iklim tropis dapat dipengaruhi oleh letak geografis dimana bahan isolasi akan dipasang. Bahan isolasi yang anti jamur dapat mengurangi atau

meminimalisir pengaruh tropis seperti yang terdapat pada bahan seperti para nitro phenol dan penta chloro phenol.

- n. Radiasi yang disebabkan oleh sinar matahari khususnya sinar ultraviolet dapat mengakibatkan kerusakan pada bahan isolasi yang terbuat dari bahan jenis organik.

2. Isolator Padat

Pada bagian ini yang akan dibahas adalah bahan isolator yang dibentuk dari bahan yang padat dan tentunya tidak mengalirkan arus listrik. Bahan isolator padat ini dapat dibagi menjadi beberapa klasifikasi antara lain:

- a. Serat, seperti kayu, kertas tekan dan asbestos.

Bahan serat seperti kayu banyak digunakan sebagai isolator karena memiliki kekuatan mekanis yang tinggi, namun kelemahan kayu adalah dapat menyerap air meskipun dapat diatasi dengan diawetkan terlebih dahulu. Kertas terbuat dari selulosa, kekurangan dari kertas adalah dapat menyerap air sehingga akan menurun kekuatan isolatornya. Asbestos memiliki serat yang tidak terlalu kuat dan mudah putus, namun sangat baik digunakan untuk isolator listrik.

Kelebihan dari bahan isolator serat antara lain:

- 1) Mempunyai fleksibilitas yang baik
- 2) Memiliki kekuatan mekanis yang tinggi
- 3) Mudah dalam pemrosesannya
- 4) Mempunyai harga yang relatif murah

Kekurangan dari bahan isolator serat antara lain:

- 1) Higroskopis dan tegangan tembusnya rendah
- 2) Bersifat menyerap air
- 3) Mudah terbakar

- b. Karet.

Karet terbuat dari getah bermacam-macam pohon karet. Karet dengan kualitas tinggi dihasilkan dari pohon karet *Hevea Braziliensis*. Dalam penyempurnaan karet, dilakukan proses vulkanisasi dimana karet akan memiliki tekstur yang lebih keras.

Kelebihan dari bahan isolator karet antara lain:

- 1) Memiliki sifat elastis atau lentur yang fleksibel terhadap tegangan
- 2) Tahan dari goresan
- 3) Tahan panas
- 4) Tahan terhadap solven/asam
- 5) Tidak beroksidasi
- 6) Tidak rusak oleh minyak bumi
- 7) Tahan air.

Kekurangan dari bahan isolator karet antara lain:

- 1) Tidak tahan terhadap keretakan
- 2) Memiliki daya lengket yang tinggi terhadap bahan-bahan lainnya

c. Polimer *thermosetting* dan *thermoplastic*.

Merupakan bahan organik dengan bobot molekul yang sangat tinggi. Saat ini polimer yang digunakan sebagai isolator menggunakan bahan sintesis. Berikut beberapa jenis resin yang dapat digunakan sebagai isolator: polyethylene, polystyrene, polyvinyl chloride dan polytetrafluoroethylene. Polimer *thermosetting* akan mengalami perubahan struktur kimiawi selama proses pembentukan. Bila dipanaskan kembali tidak dapat lunak. Berbeda untuk *thermoplastic* yang dapat mencair dengan pemanasan tanpa merubah struktur kimiawinya.

Kelebihan dari bahan isolator polimer antara lain:

- 1) Memiliki bobot yang relatif ringan
- 2) Mempunyai bentuk geometri yang sederhana
- 3) Memiliki daya tahan terhadap polusi
- 4) Waktu pembuatannya lebih singkat

Kekurangan dari bahan isolator polimer antara lain:

- 1) Mempunyai permasalahan penuaan yang dapat mempengaruhi masa pakai bahan
- 2) Memiliki harga yang cukup mahal di pasaran
- 3) Hanya memiliki kekuatan mekanik yang kecil
- 4) Permasalahan kompatibilitas material.

d. Mineral, seperti mika dan marmer.

Mika merupakan mineral yang memiliki karakteristik kekuatan mekanik yang tinggi, ketahanan terhadap panas, ketahanan terhadap pengaruh uap air, dan elastisitas yang baik. Muscovit dan flogovit merupakan contoh dari mika yang memiliki resistivitas volum berkisar $1000 \Omega \cdot \text{cm}$. karakteristik mika yang

memiliki nilai dielektrik yang tinggi dan stabilisasi sifat kimianya, mika juga dijadikan sebagai bahan pemuatan kapasitor. Marmer merupakan bahan dengan ikatan kimia yang serupa dengan batu kapur, namun sifat fisiknya berbeda. Impregnasi paraffin, polistiren, bitumen dan minyak baik untuk meningkatkan kemampuan listriknya.

Kelebihan dari bahan isolator mineral antara lain:

- 1) Tidak rusak oleh air, asam dan garam
- 2) Bisa dicetak sesuai kebutuhan
- 3) Memiliki sifat kuat dan kaku
- 4) Proses pengerjaannya mudah.

Kekurangan dari bahan isolator polimer antara lain:

- 1) Jika bahan dipanaskan pada suhu tinggi kemudian didinginkan maka bahan akan retak
- 2) Menghasilkan limbah dalam jumlah yang besar dalam proses pembuatannya

e. Keramik.

Isolator ini digunakan karena karakteristik dielektriknya. Bahan ini digunakan sebagai suspensi isolator untuk saluran tegangan tinggi, saklar pemutus, dan pemegang sikring.

Kelebihan dari bahan isolator keramik antara lain:

- 1) Bersifat tidak menyerap air
- 2) Bisa digunakan dalam ruangan yang lembab maupun di udara terbuka
- 3) Mempunyai sifat tidak menghantar listrik yang tinggi
- 4) Memiliki kekuatan mekanis yang besar
- 5) Bisa menahan beban yang menekan
- 6) Tahan akan perubahan-perubahan suhu

Kekurangan dari bahan isolator keramik antara lain:

- 1) Tidak tahan terhadap tumbukan atau benturan
- 2) Ukurannya tidak dapat dibuat lebih besar karena pada proses pembuatan akan terjadi penyusutan bahan
- 3) Memiliki harga yang relatif mahal

f. Gelas

Isolator gelas biasanya didapatkan dari pencampuran komponen pasir silikat, fosfat dan dolomit. Isolator gelas yang digunakan pada saluran listrik tegangan tinggi biasanya untuk mencegah terjadinya flashover yang

disebabkan oleh kontaminasi. Ditemukan bahwa pelapisan menghambat akumulasi kontaminan dan ditingkatkan dengan menambahkan silika pada batas tertentu. Kekerasan permukaan gelas lebih tinggi dari lapisan silikon, tetapi ketika konsentrasi silika meningkat, kekerasan lapisan menjadi terukur. Terlihat bahwa semakin tinggi persentase silika, semakin rendah kekerasan permukaan, yang mungkin atribut ke bahan diskontinuitas lapisan. Isolator gelas yang digunakan pada saluran listrik tegangan tinggi untuk mencegah terjadinya flashover yang disebabkan oleh kontaminasi. Ditemukan bahwa pelapisan menghalangi akumulasi kontaminan dan ditingkatkan dengan menambahkan silika pada batas tertentu. Dengan dasar tersebut maka isolator gelas biasanya lebih banyak dipakai untuk jaringan distribusi sekunder.

Kelebihan dari bahan isolator gelas antara lain:

- 1) Komposisinya terdiri dari bahan campuran antara pasir silikat, dolomit dan fosfat, komposisi bahan tersebut dan cara pengolahannya dapat menentukan sifat dari isolator
- 2) Lebih banyak dipergunakan pada jaringan distribusi sekunder
- 3) Memiliki harga yang lebih murah dibanding isolator keramik.

Kekurangan dari bahan isolator gelas antara lain:

- 1) Mempunyai sifat mudah berembun dalam udara lembab yang membuat debu mudah melekat
- 2) Mudah terpegaruh oleh keadaan suhu yang dapat berakibat keretakan
- 3) Tidak dapat diperbaiki
- 4) Dalam beberapa kejadian bisa memerangkap panas
- 5) Biaya yang relatif tinggi

g. Non resin, seperti aspal dan wax.

Untuk aspal, digunakan sebagai perekat pada isolator mika dengan kelas B yang dibatasi penggunaannya hingga temperatur 130 °C. Namun aspal sangat memungkinkan digunakan sebagai isolator tunggal dengan kelas E dimana temperaturnya dibatasi pada temperatur 120 °C.

Kelebihan dari bahan isolator non resin antara lain:

- 1) Tahan terhadap air
- 2) Tahan terhadap asam dan garam
- 3) Memiliki ketahanan terhadap temperatur udara

Kekurangan dari bahan isolator non resin antara lain:

- 1) Dapat terbakar atau meleleh pada temperatur tinggi
- 2) Proses pembentukannya relatif sulit
- 3) Butuh pemahaman khusus dalam prosesnya

h. Laminasi dan perekat, seperti *enamel* dan *varnish*.

Enamel merupakan pelapis yang diberikan pada kawat yang digunakan pada motor, transformator, generator dan alat ukur listrik. Salah satu bahan enamel adalah polyurethane enamel. Sedangkan *varnish* merupakan pelapis yang bertujuan untuk melindungi peralatan elektronik dari kelembaban dan bahan kimia seperti benzene dan toluene.

Kelebihan dari bahan isolator laminasi dan perekat antara lain:

- 1) Tahan terhadap air
- 2) Anti oksidasi
- 3) Tidak berkarat

Kekurangan dari bahan isolator laminasi dan perekat antara lain:

- 1) Cair dan lengket
- 2) Jika sudah beroksidasi akan menjadi keras

C. Latihan Soal

1. Jelaskan perbedaan bahan isolasi dan bahan dielektrik!
2. Hitunglah hambatan volum dari suatu kawat penghantar dengan resistivitas volumnya sebesar $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ yang terbentang sepanjang 10 m dengan diameter penampang kawat sebesar 1 mm!
3. Tentukanlah resistivitas volum suatu kawat penghantar yang terbentang sejauh 100 km, dengan diameter penampang kawat sebesar 5 cm diketahui memiliki hambatan volumnya sebesar 1,35 Ω !
4. Hitunglah hambatan volum dari suatu kawat penghantar dengan resistivitas volumnya sebesar $9,71 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ yang terbentang sepanjang 5 m dengan diameter penampang kawat sebesar 0,5 inci!
5. Tentukanlah resistivitas volum suatu kawat penghantar yang terbentang sejauh 1 m, dengan diameter penampang kawat sebesar 1 inci diketahui memiliki hambatan volumnya sebesar 0,1 Ω !

D. Daftar Pustaka

- Dekker, A. J. (1959). Electrical engineering materials. Prentice Hall.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Jain, G. C. (1967). Properties of electrical engineering materials.
- Listrik, B. P. U. I. 2011. Standar Nasional Indonesia. SNI, 225, 2011.
- Martinez-Vega, J. (Ed.). (2013). Dielectric materials for electrical engineering. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, 1981, A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 3

BAHAN ISOLASI CAIR

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, diharapkan mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan jenis dan karakteristik kelistrikan bahan isolasi cair.

B. Uraian Materi

1. Penemuan Bahan Isolasi Cair

Pada tahun 1892, General Electric memulai penggunaan minyak berbasis minyak bumi pertama sebagai cairan isolasi dalam transformator. Produksi komersial minyak mineral berbasis parafin dimulai pada tahun 1899. Minyak mineral berbasis parafin mengandung jumlah besar lilin menghasilkan titik tuang tinggi yang tidak diinginkan. Itu juga menghasilkan sejumlah besar lumpur yang tidak larut dalam kondisi iklim di bawah nol yang menurunkan viskositas dan dengan demikian mengurangi perpindahan panas kapasitas. Kemudian minyak mineral parafin digantikan oleh minyak naftenat yang membuat minyak mineral sebagai cairan sangat rendah suhu tetapi memiliki kelemahan mudah terbakar yang tinggi. Polychlorinated biphenyl (PCB) pertama kali dibuat pada tahun 1930,10 yang mengatasi sifat mudah terbakar minyak naftenat. Tapi diawal tahun 1970, diputuskan bahwa PCB tidak lagi dapat diterima oleh lingkungan dan oleh karena itu penggunaan dan produksi baru PCB telah dilarang. Dengan berakhirnya PCB, industri listrik beralih ke isolasi cair lainnya seperti ester sintetis, minyak sayur, cairan silikon, dan lain sebagainya. Minyak mineral tetap menjadi sumber utama diantara semua ini.

Struktur kimia minyak transformator sangat kompleks, yang terdiri dari hidrokarbon dan non-hidrokarbon. Nonhidrokarbon hadir dalam jumlah kecil pada minyak transformator sedangkan hidrokarbon merupakan bahan utama bagian yang hanya mengandung karbon dan hidrogen. Bahan kimia struktur hidrokarbon yang berbeda hadir dalam minyak transformator. Minyak transformator berkualitas baik mengandung senyawa kimia dalam jumlah optimal. Kehadiran

senyawa aromatik dalam minyak transformator meningkatkan stabilitas oli dalam layanan sementara terlalu banyak dapat mengurangi impuls kekuatan atau kekuatan dielektrik minyak dan meningkatkan solvabilitas sifat minyak untuk banyak partikel padat yang terendam. Sekali lagi, adanya senyawa belerang dalam konsentrasi tinggi menyebabkan korosi tembaga dalam kontak dengan minyak isolasi. Demikian pula kehadiran senyawa nitrogen dalam konsentrasi tinggi mengurangi stabilitas minyak. Sifat dasar minyak transformator yang diinginkan untuk melayani tujuan tersebut sebagai media dielektrik dan pendingin adalah kekuatan impuls yang tinggi, kekuatan listrik tinggi, dan resistivitas volume tinggi, konduktivitas termal yang tinggi, panas spesifik tinggi, titik nyala tinggi, rendah viskositas, volatilitas rendah, dan faktor disipasi dielektrik rendah. Selain itu, minyak transformator yang baik harus memiliki ketahanan yang tinggi terhadap kerusakan kimia, tidak mudah terbakar, murah dan tersedia dengan mudah.

a. Penggunaan Bahan Isolasi Cair

Dengan berbagai pertimbangan keilmuan yang ada maka sangat disarankan untuk beberapa bagian yang aktif pada komponen listrik seharusnya dilakukan isolasi yang bertujuan agar komponen listrik memiliki sistem proteksi/keamanan serta kenyamanan. Bahan isolasi cair sudah dipergunakan menjadi bahan pengisian pada beberapa komponen listrik seperti pemutus beban, kapasitor dan transformator. Kegunaan bahan tersebut selain untuk isolasi juga berguna sebagai pendingin untuk komponen listrik. Dengan dasar tersebut maka beberapa bahan isolasi cair yang ingin dipergunakan wajib memiliki tegangan tembus serta kekuatan menghantarkan panas yang tinggi, selain itu juga harus memiliki sifat listrik serta sifat kimia yang bisa mendukung daya tahan isolasi tersebut. Koordinasi isolasi merupakan hubungan antara kekuatan isolasi peralatan dengan sirkuit listrik dalam satu pihak serta karakteristik peralatan pelindungnya dalam pihak lainnya, dengan adanya proses tersebut diharapkan isolasi akan aman dari berbagai bahaya kelebihan tegangan.

Bahan isolasi cair digunakan karena mempunyai tingkat kerapatan 1000 kali atau lebih tinggi jika dibandingkan dengan isolasi gas sehingga mempunyai kekuatan dielektrik yang lebih tinggi berdasarkan hukum Paschen, selain itu isolasi cair dapat mengisi ruang kosong atau celah dari komponen yang ingin diisolasi dan secara bersamaan melewati proses

konversi untuk meniadakan panas yang terjadi diakibatkan rugi energi serta mampu memperbaiki diri sendiri apabila terjadi pelepasan muatan. Selain berbagai kelebihan yang dimilikinya, bahan isolasi cair mempunyai kekurangan utama yaitu dapat dengan mudah terkontaminasi serta rawan terhadap potensi membuat komponen menjadi berkarat yang berpotensi dapat menyebabkan komponen listrik rusak.

b. Koordinasi Isolasi Bahan Cair

Koordinasi isolasi dapat dijalankan dengan menemukan kecocokan yang dibutuhkan antara kekuatan isolasi peralatan listrik serta karakteristik peralatan pelindung terhadap kelebihan tegangan, dimana masing-masing faktor ditentukan dari seberapa kuat daya tahan impuls serta tingkat perlindungan impulsnya. Koordinasi isolasi diharapkan dapat memberikan perlindungan kepada komponen sekaligus melakukan penghematan. Beberapa sistem memerlukan perhatian dalam koordinasi isolasi seperti menentukan sifat gangguan, menentukan daya isolasi komponen (trafo, bushing dan isolator), menentukan tegangan impuls standar, sifat peralatan pelindung (arrester, CB), menentukan tingkat isolasi impuls dasar (BIL) atau sebuah tegangan besar yang masih dapat ditahan oleh komponen listrik atau kekuatan komponen listrik dalam menahan tegangan maksimum pada saat terjadi kelebihan tegangan. Sedangkan beberapa sifat listrik yang dapat memperlihatkan cara kerja cairan sebagai isolasi diantaranya:

1) *Withstand Breakdown*.

Withstand breakdown merupakan kelebihan isolator agar dapat bertahan dari proses kebobolan atau *down* pada keadaan ditekan oleh listrik yang cukup kuat.

2) Kapasitansi Listrik.

Minyak petroleum adalah perwujudan nonpolar yang efisien dikarenakan dibentuk dari percampuran zat cair hidrokarbon. Minyak petroleum merupakan campuran hidrokarbon yang terbentuk dari sisa-sisa hewan dan tumbuhan (diatom) yang hidup jutaan tahun yang lalu di lingkungan laut sebelum keberadaan dinosaurus. Selama jutaan tahun, sisa-sisa hewan dan tumbuhan ini ditutupi oleh lapisan pasir, lumpur, dan batu. Panas dan tekanan dari lapisan ini mengubah sisa-sisa menjadi apa yang sekarang disebut minyak mentah atau minyak bumi. Minyak petroleum mempunyai permitivitas pada kisaran 2 sampai 2.5. Kemandirian

permitivitas substansi nonpolar pada frekuensi menjadikan bahan tersebut lebih sering dipergunakan jika dibandingkan dengan bahan yang memiliki sifat polar. Sebagai contoh apabila terdapat air yang mempunyai permitivitas 78 untuk frekuensi 50 Hz, akan tetapi hanya mempunyai permitivitas 5 untuk gelombang mikro.

3) Faktor Daya

Variabel disipasi daya dari minyak yang berada dibawah tekanan bolak balik yang kuat akan memperlihatkan cara pegolannya karena pada keadaan memiliki beban ada beberapa kerugian dielektrik. Variabel disipasi sebagai tolak ukur kerugian daya adalah indikator yang penting untuk kapasitor dan kabel. Minyak transformator murni mempunyai variabel disipasi yang beragam sekitar 10^{-4} pada 20°C serta 10^{-3} pada 90°C dengan nilai frekuensi 50 Hz.

4) Resistivitas

Resistivitas merupakan kemampuan sebuah bahan dalam mengantarkan arus listrik, kemampuan tersebut tergantung pada seberapa besar kerapatan arus dan medan listrik. Semakin tinggi resistivitas sebuah komponen maka semakin tinggi juga medan listrik yang diperlukan untuk membuat suatu kerapatan arus. Elemen untuk resistivitas ialah $\Omega\cdot\text{m}$. dan resistivitas dilambangkan ρ . Sebuah cairan dapat dikategorikan sebagai isolasi cair apabila resistivitasnya lebih besar dari $10^9\text{ W}\cdot\text{m}$. Untuk sistem tegangan tinggi resistivitas yang dibutuhkan agar menjadi material isolasi adalah sebanyak $10^{16}\text{ W}\cdot\text{m}$ atau lebih.



Gambar 3.1 Cara Kerja Cairan Isolasi

c. Jenis Isolasi Cair

Isolasi cair merupakan bahan yang digunakan sebagai bahan pengisi pada beberapa peralatan listrik tegangan tinggi. Isolasi cair digunakan seperti pada transformator, pemutus beban dan rheostat. Bahan isolasi cair selain memiliki fungsi sebagai isolasi listrik juga berfungsi sebagai pendingin. Syarat yang perlu dipenuhi untuk isolator cair adalah daya hantar panas dan tegangan tembus yang tinggi serta memiliki nilai ekonomis. Isolator cair bisa beradaptasi sendiri apabila menghadapi tegangan tembus, disebabkan kanal *discharge* yang dialami tidak memiliki sifat sebagai konduktor tetap pada fluida. Spesifikasi listrik biasanya akan naik apabila terdapat gas yang ikut larut serta terutama impuritas ionik dan kelembaban. Tabel 3.1 merupakan sebagian contoh serta spesifikasi dari isolator cair.

Tabel 3.1. Sifat Beberapa Isolator Cair

Cairan	Tegangan Tembus (MV/cm)	Sifat
Oli mineral	1,0	Rawan terbakar, dipakai untuk oli transformator
n-heksana	1,1 – 1,3	Rawan terbakar, dipakai untuk kapasitor
Benzena	1,1	Rawan terbakar, mengandung racun
Oli silikon	1,0 – 1,2	Susah terbakar, harga mahal
Oksigen cair	2,4	Kriogenik, rawan sekali terbakar
Nitrogen cair	1,6 – 1,9	Kriogenik, untuk mendinginkan

d. Alternatif untuk minyak isolasi mineral

Dalam beberapa tahun terakhir, banyak penelitian telah dilakukan untuk mencari alternatif minyak trafo yang cocok. Banyak sintetis, serta cairan alami telah diuji dan digunakan sebagai pengganti minyak transformator. Minyak

trafo memiliki banyak kekurangan seperti kehadiran hidrokarbon aromatik polinuklear yang mungkin mudah dilepaskan ke lingkungan karena ledakan transformator, biodegradabilitas yang buruk dan kelangkaan di masa depan. Perhatian telah diberikan pada minyak nabati seperti minyak dari kedelai kacang, bunga matahari, dan ester sintetis sebagai cairan media isolasi. Telah ditemukan dalam literatur bahwa minyak nabati dan ester sintetis telah menarik perhatian paling besar di antara semua alternatif lain dari minyak transformator. Memiliki sifat mudah terbakar yang rendah, lingkungan yang dapat diabaikan dampak, dan toleransi kelembaban yang tinggi, tidak beracun bagi kehidupan manusia, titik nyala tinggi, volatilitas lebih rendah dan titik tuang lebih rendah. Penuaan cairan isolasi nabati dalam udara menyebabkan oksidasi yang mengakibatkan peningkatan viskositas. Oleh karena itu, penting untuk berhati-hati saat mengisi isolasi cairan dalam transformer untuk mengecualikan oksigen. Ini menunjukkan lebih sedikit penuaan termal kertas isolasi di dalamnya di atas suhu kisaran 70°C sampai 190°C dibandingkan dengan minyak mineral. Lagi, Konsentrasi CO dan CO_2 lebih sedikit dalam minyak nabati tua dibandingkan dengan minyak mineral tua. Namun, konsentrasi air dalam minyak nabati tua lebih banyak jika dibandingkan dengan minyak mineral tua.

e. Minyak Transformator

Minyak mineral digunakan secara umum sebagai minyak transformator. Bahan organik juga dapat digunakan sebagai minyak transformator. Hidrokarbon akan timbul dalam minyak transformator akibat adanya pengaruh panas dan rugi-rugi di dalam transformator. Tegangan tembus yang tinggi merupakan salah satu syarat minyak transformator dijadikan sebagai bahan isolasi. Performa sifat kelistrikan transformator dapat menurun karena adanya kandungan air dan pengaruh asam. Potassium hidroksida (KOH) digunakan untuk menetralsir keasaman. Sedangkan untuk kandungan air dapat dikurangi dengan bahan yang higroskopis seperti silika gel. Kekentalan dari minyak transformator memiliki peranan penting untuk fungsinya sebagai pendingin. Kekentalan relatif yang dipersyaratkan tidak lebih dari 4,2 pada temperatur 20°C . Tentunya akan menurun seiring dengan meningkatnya temperatur. Pada temperatur 50°C , kekentalannya dipersyaratkan bernilai sebesar 1,80 hingga 1,85, dan diperbolehkan hingga maksimum 2 pada temperatur 50°C . kekentalan minyak transformator akan meningkat seiring

dengan waktu penggunaannya. Hal ini berbeda dengan minyak pelicin yang kekentalannya akan menurun seiring dengan waktu penggunaan.

Lelehan dari bahan di dalam transformator, partikel yang mengapung pada minyak, dan yang mengendap di dasar tangki, yang berasal dari belitan atau pada intinya dapat menjadi pengotor minyak transformator yang akan menurunkan karakteristik tegangan tembusnya. Hal inipun akan mempengaruhi umur penggunaan atau pemakaian minyak transformator sebagai isolator. Teknik untuk memperlambat penurunan tegangan tembus telah banyak dilakukan. Ada teknik yang menggunakan gas murni (nitrogen) untuk mengisi ruangan di atas permukaan minyak. Penambahan senyawa tertentu seperti paraoksi dipenilamin juga dilakukan untuk memperpanjang umur minyak transformator. Minyak transformator juga memiliki sudut kerugian dielektrik yang akan mempengaruhi besarnya rugi daya. Besarnya sudut kerugian dielektrik sebesar $\tan \theta$.

f. Indikator kinerja Isolator cair

Isolator cair dapat dikatakan baik digunakan untuk keperluan tertentu bergantung pada indikator kinerjanya. Indikator tersebut adalah,

1) Titik Nyala dan Titik Api

Titik nyala merupakan temperatur terendah dari isolator cair dapat menguap sehingga dapat membentuk campuran yang dapat terbakar di udara. Nilai titik nyala yang rendah, menunjukkan kemudahan untuk terbakar. Sedangkan titik api menunjukkan temperatur terendah dimana uap yang mudah terbakar akan tetap terbakar diudara setelah terpicu. Minyak tumbuhan memiliki titik nyala dan titik api yang lebih tinggi dibandingkan dengan minyak mineral. Karakteristik termal dari sampel tua dan muda dari

mineral dan minyak nabati telah dipelajari para peneliti dan disimpulkan bahwa minyak nabati memiliki perilaku termal yang lebih baik daripada minyak mineral. Minyak kelapa sawit dan kelapa memiliki titik nyala dan titik api yang aman dibandingkan dengan minyak mineral.

2) Sifat Pendinginan Percikan Api

Karakteristik ini menunjukkan bagaimana isolator cair dapat mendinginkan dan meredam percikan api. Minyak tumbuhan juga memiliki nilai sifat yang dapat mendinginkan percikan api yang lebih baik dibandingkan minyak mineral. Telah ditemukan bahwa produksi asetilena dan hidrogen

di bawah percikan api, kondisi untuk minyak mineral jauh lebih banyak dibandingkan dengan minyak nabati. Tetapi produksi CO dan CO₂, karena pemutusan gugus karbonil-COO, lebih banyak untuk minyak nabati dibandingkan dengan minyak mineral.

3) Kekuatan Kegagalan Dielektrik

Kekuatan dielektrik sangat dipengaruhi kelembaban. Minyak dari tumbuhan memiliki kekuatan dielektrik yang lebih baik dari minyak mineral. Minyak sawit dan kelapa memiliki kekuatan dielektrik yang lebih baik dibandingkan minyak mineral. Kekuatan dielektrik, yang tergantung pada kelembaban di

ppm, lebih baik untuk minyak nabati dibandingkan minyak mineral. Itu merupakan efek kelembaban pada perilaku dielektrik minyak ester kurang dibandingkan dengan minyak mineral. Minyak kelapa dan minyak sawit memiliki kekuatan dielektrik yang lebih baik dibandingkan dengan minyak mineral.

4) Stabilitas Oksidasi

Oksidasi pada isolator cair dapat mempengaruhi tegangan kegagalan dielektrik dan keasaman. Minyak dari tumbuhan memiliki kestabilan yang baik dibandingkan minyak mineral. Studi eksperimental tentang oksidasi stabilitas telah menemukan bahwa ada sedikit perubahan tegangan tembus dan nilai asam minyak nabati yang menyimpulkan bahwa minyak nabati memiliki stabilitas oksidasi yang unggul dibandingkan dengan minyak mineral.

2. Larutan Gas

Analisis gas yang berbeda dalam isolasi transformator minyak untuk mengukur dan mengidentifikasi gas yang mudah terbakar terlarut disebut analisis gas terlarut. Ini digunakan sebagai tes diagnostik khusus untuk internal transformator

pemantauan kondisi kesehatan. Dari hampir 3000 senyawa hidrokarbon minyak isolasi transformator, hanya sebagai sebanyak tujuh gas biasanya dipertimbangkan untuk tujuan diagnostik. Ada berbagai metode yang digunakan untuk memprediksi kondisi kesehatan transformator. Beberapa di antara metode tersebut adalah metode rasio roger, metode segitiga duval, metode rasio IEC, metode gas utama dan metode gas yang mudah terbakar.

a. Metode Rasio Roger

Metode rasio roger merupakan alat tambahan yang dapat digunakan untuk melihat gas terlarut dalam minyak trafo. Metode rasio rogers membandingkan jumlah gas utama yang berbeda dengan membagi satu ke yang lain. Ini memberikan rasio jumlah satu gas kunci ke yang lain. Pada suhu tertentu, satu gas akan dihasilkan lebih banyak daripada gas lainnya. Rogers menggunakan hubungan ini dan menentukan bahwa jika rasio tertentu ada, maka suhu tertentu telah tercapai. Dengan membandingkan sejumlah besar trafo dengan rasio gas yang sama dan data yang dikumpulkan saat trafo diperiksa, Rogers kemudian dapat mengatakan bahwa ada kesalahan tertentu. Seperti kunci analisis gas di atas, metode ini bukanlah hal yang pasti dan hanya alat tambahan untuk digunakan dalam menganalisis masalah transformator. Metode rasio rogers, menggunakan rasio gas tiga kunci, yang didasarkan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Doerneburg, yang menggunakan rasio gas lima kunci. Metode rasio hanya valid jika terdapat sejumlah besar gas yang digunakan dalam rasio. Aturan yang baik adalah jangan pernah membuat keputusan hanya berdasarkan rasio jika salah satu dari dua gas yang digunakan dalam rasio kurang dari 10 kali jumlah yang dapat dideteksi oleh kromatografi gas. Aturan ini memastikan bahwa ketidakakuratan instrumen memiliki sedikit efek pada rasio. Jika salah satu gas lebih rendah dari 10 kali batas deteksi, kemungkinan besar tidak memiliki masalah khusus yang diwakili oleh rasio ini. Jika gas tidak setidaknya 10 kali batas ini tidak berarti tidak dapat menggunakan Rasio Rogers, itu berarti bahwa hasilnya tidak pasti jika gas setidaknya pada level ini. Ini adalah pengingat lain bahwa DGA bukanlah ilmu pasti dan tidak ada satu cara terbaik yang mudah untuk menganalisis masalah transformator. Perkiraan batas deteksi adalah sebagai berikut, tergantung pada lab dan peralatannya. Ketika kesalahan terjadi di dalam transformator, tidak ada masalah dengan jumlah gas minimum di mana rasionya valid. Akan ada lebih dari cukup gas yang ada. Jika transformator telah beroperasi secara normal selama beberapa waktu dan DGA menunjukkan peningkatan jumlah gas secara tiba-tiba, pertama-tama ambil sampel kedua untuk memverifikasi bahwa ada masalah. Jika DGA berikutnya menunjukkan gas lebih sesuai dengan DGA sebelumnya, sampel minyak sebelumnya terkontaminasi, dan tidak ada lagi alasan untuk khawatir. Jika sampel kedua juga menunjukkan peningkatan gas, masalahnya nyata.

Untuk menerapkan Metode Rasio, kurangi gas yang ada sebelum peningkatan gas tiba-tiba. Ini mengeluarkan gas yang telah dihasilkan sebelumnya karena penuaan normal dan dari masalah sebelumnya. Hal ini terutama berlaku untuk rasio menggunakan H_2 dan gas insulasi selulosa CO dan CO_2 , yang dihasilkan oleh penuaan normal. Rasio dan indikasi kesalahan yang dihasilkan didasarkan pada sejumlah besar DGA dan kegagalan transformator dan apa yang ditemukan setelah kegagalan. Ada metode rasio lain, tetapi hanya Metode Rasio Rogers yang akan dibahas karena ini adalah yang paling umum digunakan. Etilen dan etana kadang-kadang disebut gas logam panas. Perhatikan bahwa kesalahan ini tidak melibatkan isolasi kertas, karena CO sangat rendah. H_2 dan C_2H_2 keduanya kurang dari 10 kali batas deteksi. Ini berarti diagnosis tidak memiliki tingkat kepercayaan 100% benar. Namun, karena etilen yang tinggi, gangguan mungkin merupakan sambungan yang buruk di mana kabel masuk dibaut ke kabel belitan, mungkin kontak tap changer yang buruk, atau ground inti tambahan (arus sirkulasi besar di tangki dan teras). Contoh ini dipilih untuk menunjukkan trafo yang bukan merupakan diagnosis jelas. Penilaian teknik selalu diperlukan. Sejumlah kecil asetilen ada tepat di atas batas deteksi 1 ppm. Ini bukan busur energi tinggi karena jumlahnya kecil. Kemungkinan besar, itu dihasilkan oleh sambaran petir terdekat atau lonjakan tegangan.

b. Metode Segitiga Duval

Analisis gas terlarut (DGA) banyak digunakan untuk mendeteksi kesalahan yang baru dimulai pada transformator. Tinjauan singkat tentang interpretasi DGA dalam transformator disajikan, dengan penekanan khusus pada metode segitiga duval. Ditunjukkan bagaimana keakuratan hasil laboratorium DGA dapat mempengaruhi keandalan diagnosis DGA. Level gas minimum dalam layanan di mana diagnosis dapat dicoba ditunjukkan, serta level gas yang diamati sebelum kegagalan. Pengantar Beberapa metode interpretasi DGA dalam transformator dalam pelayanan disediakan dalam Standar IEC 60599, Panduan IEEE C57.104, serta dalam ulasan yang diterbitkan tentang masalah ini. Metode segitiga duval dijelaskan dalam Standar IEC dan dalam ulasan yang dipublikasikan, bagaimanapun, pengguna terkadang tidak nyaman dengan penggunaan koordinat segitiga. Pembentukan gas dalam pelayanan Minyak isolasi mineral adalah campuran kompleks molekul hidrokarbon, dalam bentuk linier (parafin) atau siklik (sikloalifatik atau aromatik),

mengandung gugus kimia CH_3 , CH_2 dan CH yang terikat bersama. Pemutusan beberapa ikatan CH dan CC akibat pelepasan panas atau listrik akan menghasilkan fragmen radikal atau ionik seperti H , CH_3 , CH_2 , CH atau C , yang akan bergabung kembali membentuk molekul gas seperti hidrogen (H_2), metana ($\text{CH}_3\text{-H}$), etana ($\text{CH}_3\text{-CH}_3$), etilena ($\text{CH}_2\text{=CH}_2$) atau asetilena (CH CH). Semakin banyak energi yang dibutuhkan untuk membentuk ikatan kimia di atas. Hidrogen (H_2), metana (CH_4) dan etana (C_2H_6) dengan demikian disukai pada tingkat energi rendah, seperti pada pelepasan sebagian korona atau pada suhu yang relatif rendah ($< 500^\circ \text{C}$), etilen (C_2H_4) pada suhu menengah, dan asetilena (C_2H_2) pada suhu yang sangat tinggi ($> 1000^\circ \text{C}$) seperti pada busur. Isolasi kertas terdiri dari molekul selulosa kompleks, sebagian besar dalam bentuk siklik, yang mengandung gugus kimia CH_2 , CH dan CO . Ikatan molekul C-O lebih lemah, menghasilkan pembentukan gas pada suhu serendah 100°C , dan karbonisasi kertas lengkap pada suhu berkisar 300°C .

c. Metode Rasio IEC

Analisis gas terlarut (DGA) minyak isolasi dalam transformator berinsulasi minyak adalah salah satu teknik yang paling berguna untuk mendeteksi kesalahan yang baru dimulai. Berbagai metode, seperti metode kunci gas, metode rasio, metode representasi grafis terkenal untuk menginterpretasikan hasil DGA. Jika terdapat lebih dari satu gangguan pada transformator, metode ini terkadang gagal untuk mendiagnosis. Metode tiga rasio IEC banyak digunakan, tetapi dalam banyak kasus metode ini tidak dapat mendiagnosis secara akurat (seperti tidak ada pencocokan, banyak kesalahan). Metode ini mengusulkan metode fuzzy three ratio, dianggap bahwa kelemahan Metode tiga rasio konvensional terletak pada saat ketika rasio melintasi batas pengkodean. Script berbasis MATLAB membuktikan bahwa metode fuzzy three ratio yang dibahas dapat mengatasi kelemahan metode tiga rasio konvensional yang tidak dapat mendiagnosis multi-fault dan tidak ada kode yang cocok untuk diagnosis.

d. Metode Gas Kunci

Metode gas kunci digunakan untuk menafsirkan DGA yang ditetapkan dalam IEEE. Gas utama yang terbentuk dari degradasi isolasi minyak dan kertas adalah hidrogen (H_2), metana (CH_4), etana (C_2H_6), etilen (C_2H_4), asetilen (C_2H_2), karbon monoksida (CO), dan oksigen (O_2). Kecuali karbon monoksida

dan oksigen, semua gas ini terbentuk dari degradasi minyak itu sendiri. Karbon monoksida, karbon dioksida (CO_2), dan oksigen terbentuk dari degradasi isolasi selulosa (kertas). Karbon dioksida, oksigen, nitrogen (N_2), dan uap air juga dapat diserap dari udara, jika ada antarmuka minyak/udara atau jika ada kebocoran di tangki. Beberapa transformator kami memiliki selimut nitrogen bertekanan diatas minyak dan, dalam beberapa kejadian, nitrogen mungkin mendekati saturasi. Jenis dan jumlah gas ditentukan oleh dimana kesalahan terjadi pada transformator dan tingkat keparahan dan energi peristiwa tersebut. Peristiwa berkisar dari peristiwa berenergi rendah, seperti pelepasan sebagian, menghasilkan hidrogen dan sejumlah kecil metana dan etana, hingga busur berkelanjutan berenergi sangat tinggi, yang mampu menghasilkan semua gas, termasuk asetilen, yang membutuhkan energi paling banyak.

C. Latihan Soal

1. Jelaskan bagaimana karakteristik dielektrik dari cairan!
2. Bandingkan sifat isolasi antara oli mineral, oksigen cair dan nitrogen cair!

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 4

BAHAN ISOLASI GAS

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, diharapkan mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan jenis dan karakteristik kelistrikan bahan isolasi gas.

B. Uraian Materi

1. Bahan isolasi gas

Bahan isolasi gas dipergunakan selain untuk isolator juga digunakan untuk media penyalur panas. Udara dan sulphur hexa fluorida (SF_6) adalah bahan isolasi gas yang banyak digunakan karena karakteristiknya yang baik.

Bahan isolasi gas pada dasarnya merupakan isolator listrik dasar dan murni. Dengan menerapkan medan listrik yang masuk akal, bahan isolasi gas dapat terpolarisasi. Vakum, padat, cairan dan gas dapat menjadi bahan isolasi. Bahan isolasi gas disebut juga sebagai gas isolator, ini adalah bahan isolasi dalam keadaan gas yang dapat mencegah pelepasan listrik. Bahan isolasi gas praktis tidak bebas dari partikel bermuatan listrik. Ketika medan listrik perifer diterapkan pada gas, elektron bebas terbentuk. Elektron bebas ini dipercepat dari katoda ke anoda oleh tekanan listrik yang menerapkan gaya. Sebenarnya, itu adalah penurunan resistansi bahan isolasi gas. Ini akan terjadi ketika tegangan yang diberikan meningkat daripada tegangan tembus (kekuatan dielektrik). Akibatnya, gas akan mulai mengalir. Artinya, akan ada kenaikan tegangan yang kuat di area kecil di dalam gas. Area kenaikan tegangan yang kuat ini adalah alasan ionisasi parsial gas di dekatnya dan memulai konduksi. Ini dibuat dengan sengaja dalam pelepasan tekanan rendah (dalam presipitator elektrostatik atau dalam lampu neon). Hukum Paschen mendekati tegangan yang menyebabkan gangguan listrik ($V = f(pd)$). Ini sebenarnya merupakan persamaan yang menjelaskan tegangan tembus sebagai fungsi produk dari tekanan dan panjang celah. Di mana kurva diperoleh, ini disebut kurva Paschen. Disini, saat tekanan diturunkan, tegangan tembus juga berkurang dan kemudian secara bertahap

meningkat melebihi nilai aslinya. Pada tekanan standar, tegangan tembus berkurang dengan panjang celah hingga suatu titik. Ketika panjang celah berkurang melebihi titik itu, maka tegangan tembus mulai meningkat dan melebihi nilai aslinya. Pada tekanan tinggi dan kondisi panjang celah meningkat, tegangan tembus kurang lebih sebanding dengan produk keduanya. Ini kira-kira proporsional karena efek elektroda (ketidakaturan mikroskopis elektroda dapat menyebabkan kerusakan). Tegangan tembus gas dielektrik juga secara kasar sebanding dengan densitas. Ketika elektron ini mencapai energi yang cukup untuk melepaskan elektron dari atom atau molekul gas dan setelah itu, elektron tidak terlibat oleh molekul, dan kemudian konsentrasi elektron akan mulai meningkat secara eksponensial. Akibatnya terjadi kerusakan. Beberapa gas seperti SF_6 terikat kuat (elektron terikat kuat pada molekul), beberapa terikat lemah misalnya oksigen dan beberapa tidak terikat sama sekali misalnya N_2 . Contoh gas dielektrik adalah Amonia, Udara, Karbon dioksida, Sulfur heksafluorida (SF_6), Karbon Monoksida, Nitrogen, Hidrogen dan lainnya. Kadar air dalam bahan isolator gas dapat mengubah sifat menjadi isolator yang baik. Mekanisme kerusakan akan secara langsung tergantung pada sifat bahan isolasi gas dan polaritas elektroda dimana kerusakan dimulai. Jika kerusakan dimulai di katoda, maka suplai elektron inisiasi dilakukan oleh elektroda itu sendiri. Kemudian elektron akan mengalami percepatan, terjadi pembentukan elektron yang banyak dan mengakibatkan kerusakan. Jika kerusakan dimulai di anoda, maka suplai elektron inisiasi adalah dari gas itu sendiri. Untuk misalnya udara dan gas SF_6 . Titik tajam kecil dalam gas juga bisa menjadi alasan rusaknya celah gas. Ini terjadi sebagai hasil dari proses pemecahan langkah demi langkah. Pembentukan korona (yaitu pelepasan korona) dapat dikaitkan dengan ini. Ini sebenarnya adalah pelepasan energi pendek (pengosongan) dan menghasilkan saluran gas yang terionisasi dengan lemah. Ketika medan terlalu tinggi, salah satu saluran ini akan berjalan. Sifat yang disukai dari bahan isolasi gas yang sangat baik adalah kekuatan isolasi maksimal, perpindahan panas halus, tahan api, kemalasan kimia terhadap bahan konstruksi yang digunakan, kelembaman, tidak beracun, kondensasi suhu kecil, ketahanan termal yang tinggi dan dapat diperoleh dengan biaya rendah. Bahan isolasi gas digunakan dalam transformer, waveguides radar, pemutus sirkuit, switchgears, switching tegangan tinggi, pendingin, Bahan isolasi gas biasanya digunakan dalam aplikasi tegangan tinggi.

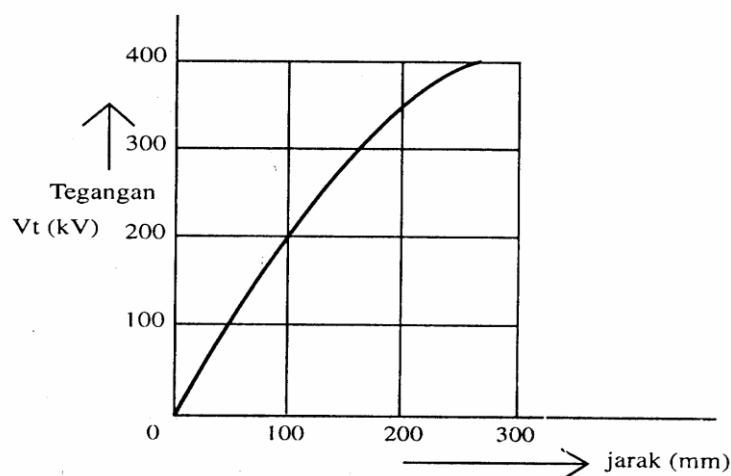
2. Isolator Gas Sederhana

Isolator gas sederhana merupakan salah satu jenis isolator berwujud gas yang proses untuk mendapatkannya paling sederhana atau dengan kata lain mudah didapatkan, Isolator gas sederhana memiliki beberapa jenis bahan isolasi diantaranya adalah,

a. Udara

Bahan isolasi yang mudah diperoleh dan murah adalah udara. Udara memiliki karakteristik tegangan tembus yang relatif besar sekitar 30 kV/cm. Pemasangan jaringan distribusi baik tegangan rendah (JTR), menengah (JTM) maupun tinggi (JTT) dipisahkan dengan jarak tertentu dengan memanfaatkan udara sebagai isolatornya. Pada Gambar 4.1 digambarkan hubungan antara tegangan tembus dan jarak dengan medium udara.

Terlihat dari Gambar 4.1 hubungan tegangan tembus dengan jarak dalam medium udara tidak linier. Locatan atau percikan bunga api akan timbul di udara bila tegangan tembusnya terlampaui. Bila tegangan semakin meningkatkan akan terjadi busur api. Ionisasi udarapun dapat terjadi diantara dua elektroda yang terpisah pada jarak tertentu. Ionisasi akan ditunjukkan dengan munculnya warna terang kebiruan yang disebut korona. Tekanan udara mempengaruhi besarnya tegangan tembus. Tekanan udara yang semakin tinggi akan meningkatkan tegangan tembusnya. Namun perlu diingat, pada keadaan vakum, tegangan tembusnya menjadi jauh lebih besar, sehingga keadaan vakum banyak digunakan atau diterapkan pada beberapa peralatan listrik.



Gambar 4.1. Tegangan Tembus pada Medium Udara $\{V_t = f(\text{Celah Udara})$ pada $p = 1 \text{ atm}$, $F = 50 \text{ Hz}$.

b. Nitrogen

Nitrogen merupakan suatu gas yang membentuk 75% (bobot) dan 8 (volume) atmosfer, nitrogen dapat didaur ulang untuk mendapatkan perubahan dalam senyawa nitrogen dan pergerakan senyawa senyawa nitrogen yang disebabkan oleh tumbuhan, binatang dan bakteri. Nitrogen penting untuk industri kimia karena digunakan untuk membuat pupuk, asam nitrat, nilon, pewarna dan bahan peledak. Untuk membuat produk ini, nitrogen pertama-tama harus direaksikan dengan hidrogen untuk menghasilkan amonia. Hal tersebut dilakukan oleh proses Haber. 150 juta ton amonia diproduksi dengan cara ini setiap tahun. Gas nitrogen juga digunakan untuk memberikan atmosfer yang tidak reaktif. Ini digunakan dengan cara ini untuk mengawetkan makanan, dan dalam industri elektronik selama produksi transistor dan dioda. Sejumlah besar nitrogen digunakan dalam anil stainless steel dan produk pabrik baja lainnya. Annealing adalah perlakuan panas yang membuat baja lebih mudah untuk bekerja. Nitrogen cair sering digunakan sebagai refrigeran. Ini digunakan untuk menyimpan sperma, telur, dan sel lain untuk penelitian medis dan teknologi reproduksi. Ini juga digunakan untuk membekukan makanan dengan cepat, membantu mereka mempertahankan kelembapan, warna, rasa, dan tekstur. Nitrogen didaur ulang secara alami oleh organisme hidup melalui siklus nitrogen. Nitrogen diambil oleh tanaman hijau dan ganggang sebagai nitrat, dan digunakan untuk membangun basa yang dibutuhkan untuk membangun DNA, RNA dan semua asam amino. Asam amino adalah blok bangunan protein. Hewan memperoleh nitrogen dengan memakan makhluk hidup lain. Mereka mencerna protein dan DNA menjadi basa dan asam amino penyusunnya, membentuknya kembali untuk digunakan sendiri. Mikroba di dalam tanah mengubah senyawa nitrogen kembali menjadi nitrat untuk digunakan kembali oleh tanaman. Pasokan nitrat juga diisi ulang oleh bakteri pengikat nitrogen yang memperbaiki nitrogen langsung dari atmosfer. Hasil panen dapat sangat ditingkatkan dengan menambahkan pupuk kimia ke tanah, yang dibuat dari amonia. Jika digunakan sembarangan, pupuk tersebut dapat merembes keluar dari tanah ke sungai dan danau, menyebabkan alga tumbuh dengan cepat. Ini dapat menghalangi cahaya yang mencegah fotosintesis. Oksigen terlarut segera habis dan sungai atau danau mati. Nitrogen membentuk 78% dari udara, berdasarkan volume. Itu diperoleh dengan distilasi udara cair. Sekitar 45 juta ton diekstraksi setiap

tahun. Itu ditemukan, sebagai senyawa, di semua makhluk hidup dan karenanya juga dalam batu bara dan bahan bakar fosil lainnya.

c. Helium

Helium merupakan gas paling ringan setelah hidrogen, helium terdapat dalam bagian atmosfer sekitar 1 berbanding 200.000. Helium merupakan unsur kimia yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, tidak beracun, tidak mudah terbakar dan merupakan unsur pertama pada golongan gas mulia dalam tabel periodik.. Perlu diingat bahwa perpindahan panas suhu dari gas helium adalah 10 kali lebih besar dibandingkan SF_6 . Kemudian helium juga memiliki sifat perpindahan panas yang terjadi lebih tinggi dari SF_6 . Helium digunakan sebagai media pendingin untuk *Large Hadron Collider* (LHC), dan magnet superkonduktor dalam pemindai MRI dan spektrometer NMR. Itu juga digunakan untuk menjaga instrumen satelit tetap dingin dan digunakan untuk mendinginkan oksigen cair dan hidrogen yang menggerakkan kendaraan ruang angkasa Apollo. Karena densitasnya yang rendah, helium sering digunakan untuk mengisi balon dekoratif, balon cuaca, dan kapal udara. Hidrogen pernah digunakan untuk mengisi balon tetapi sangat reaktif. Helium juga digunakan untuk memberikan atmosfer pelindung inert untuk membuat serat optik dan semikonduktor, dan untuk pengelasan busur. Helium juga digunakan untuk mendeteksi kebocoran, seperti pada sistem AC mobil, dan karena berdifusi dengan cepat, helium digunakan untuk mengembangkan kantung udara mobil setelah benturan. Campuran 80% helium dan 20% oksigen digunakan sebagai atmosfer buatan untuk penyelam laut dalam dan lainnya yang bekerja di bawah kondisi bertekanan. Laser gas helium-neon digunakan untuk memindai kode batang di kasir supermarket. Penggunaan baru untuk helium adalah mikroskop helium-ion yang memberikan resolusi gambar yang lebih baik daripada mikroskop elektron pemindaian. Helium tidak memiliki peran biologis yang diketahui. Helium tidak beracun. Setelah hidrogen, helium adalah unsur paling melimpah kedua di alam semesta. Itu ada di semua bintang. Itu, dan masih, terbentuk dari peluruhan partikel alfa elemen radioaktif di Bumi. Beberapa helium yang terbentuk lolos ke atmosfer, yang mengandung sekitar 5 bagian per juta volume. Ini adalah keseimbangan dinamis, dengan helium berdensitas rendah terus-menerus keluar ke luar angkasa. Tidak ekonomis untuk mengekstrak helium dari udara. Sumber utamanya adalah gas alam, yang dapat mengandung hingga 7% helium.

d. Hidrogen

Pada awal 1500-an, alkemis Paracelsus mencatat bahwa gelembung yang dilepaskan ketika serbuk besi ditambahkan ke asam sulfat mudah terbakar. Pada tahun 1671 Robert Boyle melakukan pengamatan yang sama. Tidak ada yang menindaklanjuti penemuan hidrogen mereka, sehingga Henry Cavendish mendapat penghargaan pada 1766 karena mengumpulkan gelembung dan menunjukkan bahwa hidrogen berbeda dari gas lain. Dia kemudian menunjukkan bahwa ketika hidrogen terbakar maka akan membentuk air, sehingga mengakhiri kepercayaan bahwa air adalah sebuah elemen. Gas itu diberi nama hidro-gen, yang berarti pembentuk air, oleh Antoine Lavoisier. Pada tahun 1931, Harold Urey dan rekan-rekannya di Universitas Columbia di AS mendeteksi bentuk hidrogen kedua yang lebih langka. Ini memiliki dua kali massa hidrogen normal, dan mereka menamakannya deuterium. Beberapa orang melihat gas hidrogen sebagai bahan bakar masa depan yang bersih karena dihasilkan dari air dan kembali ke air ketika dioksidasi. Sel bahan bakar bertenaga hidrogen semakin dilihat sebagai sumber energi bebas polusi dan sekarang digunakan di beberapa bus dan mobil. Hidrogen juga memiliki banyak kegunaan lain dalam industri kimia digunakan untuk membuat amonia untuk pupuk pertanian (proses Haber) dan sikloheksana dan metanol, yang merupakan zat antara dalam produksi plastik dan obat-obatan. Ini juga digunakan untuk menghilangkan belerang dari bahan bakar selama proses penyulingan minyak. Sejumlah besar hidrogen digunakan untuk menghidrogenasi minyak untuk membentuk lemak, misalnya untuk membuat margarin. Dalam industri kaca, hidrogen digunakan sebagai atmosfer pelindung untuk membuat lembaran kaca datar. Dalam industri elektronik digunakan sebagai gas pembilasan selama pembuatan chip silikon. Kepadatan hidrogen yang rendah menjadikannya pilihan alami untuk salah satu kegunaan praktis pertamanya adalah mengisi balon dan kapal udara. Namun, ia bereaksi keras dengan oksigen (untuk membentuk air) dan masa depannya dalam mengisi kapal udara berakhir ketika kapal udara Hindenburg terbakar. Hidrogen adalah elemen penting bagi kehidupan. Hal ini hadir dalam air dan di hampir semua molekul dalam makhluk hidup. Namun, hidrogen itu sendiri tidak memainkan peran yang sangat aktif. Ia tetap terikat pada atom karbon dan oksigen, sedangkan kimia kehidupan berlangsung di tempat yang lebih aktif yang melibatkan, misalnya, oksigen, nitrogen, dan fosfor. Hidrogen

adalah unsur yang paling melimpah di alam semesta. Itu ditemukan di matahari dan sebagian besar bintang, dan planet Jupiter sebagian besar terdiri dari hidrogen. Di Bumi, hidrogen ditemukan dalam jumlah terbesar sebagai air. Ia hadir sebagai gas di atmosfer hanya dalam jumlah kecil dan kurang dari 1 bagian per juta volume. Setiap hidrogen yang memasuki atmosfer dengan cepat lolos dari gravitasi bumi ke luar angkasa. Sebagian besar hidrogen diproduksi dengan memanaskan gas alam dengan uap untuk membentuk syngas (campuran hidrogen dan karbon monoksida). Syngas dipisahkan untuk menghasilkan hidrogen. Hidrogen juga dapat diproduksi dengan elektrolisis air.

e. Gas Oksida

Isolator gas oksida adalah salah satu jenis isolator berwujud gas yang terdiri dari satu atau lebih unsur oksigen yang bergabung dengan elemen lain. Nitrous oxide (N_2O), juga disebut dinitrogen monoksida, gas tertawa, atau nitrous, salah satu dari beberapa oksida nitrogen, gas tidak berwarna dengan bau dan rasa manis yang menyenangkan, yang bila dihirup menghasilkan ketidakpekaan terhadap rasa sakit yang didahului oleh histeria ringan, terkadang tawa (karena menghirup dalam jumlah kecil memberikan efek euforia singkat dan nitrous oxide tidak ilegal untuk dimiliki, zat tersebut telah digunakan sebagai obat rekreasional.) Nitrous oxide ditemukan oleh ahli kimia Inggris Joseph Priestley pada tahun 1772, ahli kimia Inggris lainnya, Humphry Davy, kemudian menamakannya dan menunjukkan efek fisiologisnya. Penggunaan utama nitrous oxide adalah sebagai anestesi dalam operasi bedah dengan durasi singkat; inhalasi berkepanjangan menyebabkan kematian. Gas ini juga digunakan sebagai propelan dalam aerosol makanan. Dalam balap mobil, nitrous oxide disuntikkan ke asupan udara mesin, oksigen ekstra memungkinkan mesin untuk membakar lebih banyak bahan bakar per langkah. Ini dibuat oleh aksi seng pada asam nitrat encer, oleh aksi hidroksilamin hidroklorida ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) pada natrium nitrit (NaNO_2), dan, paling umum, oleh dekomposisi amonium nitrat (NH_4NO_3).

f. Gas Karbondioksida

Gas karbondioksida merupakan karbon dioksida, (CO_2), gas tidak berwarna yang memiliki bau tajam yang samar dan rasa asam. Ini adalah salah satu gas rumah kaca paling penting yang terkait dengan pemanasan global, tetapi merupakan komponen kecil dari atmosfer bumi (sekitar 3 volume dalam

10.000), terbentuk dalam pembakaran bahan yang mengandung karbon, dalam fermentasi, dan dalam respirasi hewan dan digunakan oleh tumbuhan dalam fotosintesis karbohidrat. Kehadiran gas di atmosfer membuat sebagian energi radiasi yang diterima Bumi tidak dikembalikan ke luar angkasa, sehingga menghasilkan apa yang disebut efek rumah kaca. Secara industri, itu dipulihkan untuk berbagai aplikasi beragam dari gas buang, sebagai produk sampingan dari persiapan hidrogen untuk sintesis amonia, dari limekiln, dan dari sumber lain. Karbon dioksida diakui sebagai gas yang berbeda dari yang lain pada awal abad ke-17 oleh ahli kimia Belgia, Jan Baptista van Helmont, yang mengamatnya sebagai produk fermentasi dan pembakaran. Ini mencair setelah kompresi hingga 75 kg per sentimeter persegi (1.071 pon per inci persegi) pada 31° C (87,4° F) atau hingga 16–24 kg per cm persegi (230–345 pon per inci persegi) pada 23 hingga 12° C (–10 hingga 10° F). Pada pertengahan abad ke-20, sebagian besar karbon dioksida dijual sebagai cairan. Jika cairan dibiarkan mengembang hingga tekanan atmosfer, ia mendingin dan sebagian membeku menjadi padatan seperti salju yang disebut es kering yang menyublim (langsung menjadi uap tanpa meleleh) pada 78,5° C (–109,3° F) pada tekanan suasana normal. Pada suhu biasa, karbon dioksida cukup tidak reaktif; di atas 1.700° C (3.100° F) sebagian terurai menjadi karbon monoksida dan oksigen. Hidrogen atau karbon juga mengubahnya menjadi karbon monoksida pada suhu tinggi. Amonia bereaksi dengan karbon dioksida di bawah tekanan untuk membentuk amonium karbamat, kemudian urea, komponen penting dari pupuk dan plastik. Karbon dioksida sedikit larut dalam air (1,79 volume per volume pada 0° C dan tekanan atmosfer, jumlah yang lebih besar pada tekanan yang lebih tinggi), membentuk larutan asam lemah. Larutan ini mengandung asam dibasa yang disebut asam karbonat (H_2CO_3). Karbon dioksida digunakan sebagai zat pendingin, dalam alat pemadam kebakaran, untuk menggembungkan rakit penyelamat dan juga jaket pelampung, meledakkan batu bara, karet berbusa dan plastik, mendorong pertumbuhan tanaman di rumah kaca, melumpuhkan hewan sebelum disembelih, dan dalam minuman berkarbonasi. Magnesium yang menyala terus membakar karbon dioksida, tetapi gas tidak mendukung pembakaran sebagian besar bahan. Paparan manusia yang terlalu lama terhadap konsentrasi 5 persen karbon dioksida dapat menyebabkan ketidaksadaran dan kematian.

g. Gas Sulphurdioksida

Gas sulphurdioksida adalah senyawa anorganik, gas beracun yang berat, tidak berwarna. Gas ini diproduksi dalam jumlah besar dalam langkah-langkah antara pembuatan asam sulfat. Sulfur dioksida memiliki bau yang menyengat dan menjengkelkan, akrab seperti bau korek api. Terjadi di alam dalam gas vulkanik dan dalam larutan di perairan beberapa mata air hangat, sulfur dioksida biasanya dibuat secara industri dengan pembakaran di udara atau oksigen dari belerang atau senyawa belerang seperti pirit besi atau pirit tembaga. Sejumlah besar belerang dioksida terbentuk dalam pembakaran bahan bakar yang mengandung belerang. Di atmosfer ia dapat bergabung dengan uap air untuk membentuk asam sulfat, komponen utama hujan asam; pada paruh kedua abad ke-20, langkah-langkah untuk mengendalikan hujan asam diadopsi secara luas. Sulfur dioksida adalah prekursor trioksida (SO_3) yang digunakan untuk membuat asam sulfat. Di laboratorium, gas dapat dibuat dengan mereduksi asam sulfat (H_2SO_4) menjadi asam sulfat (H_2SO_3), yang terurai menjadi air dan sulfur dioksida, atau dengan mengolah sulfat (garam dari asam sulfat) dengan asam kuat, seperti asam klorida, lagi. membentuk asam sulfat. Sulfur dioksida dapat dicairkan di bawah tekanan sedang pada suhu ruangan, cairan membeku pada 73°C ($-99,4^\circ \text{F}$) dan mendidih pada 10°C (14°F) di bawah tekanan atmosfer. Meskipun kegunaan utamanya adalah dalam pembuatan asam sulfat, sulfur trioksida, dan sulfit, sulfur dioksida juga digunakan sebagai desinfektan, zat pendingin, zat pereduksi, pemutih, dan pengawet makanan, terutama pada buah-buahan kering.

h. Gas Hidrokarbon

Gas hidrokarbon merupakan suatu senyawa yang terdiri dari unsur karbon dan unsur hidrogen. Seluruh hidrokarbon memiliki rantai karbon dan atom-atom hidrogen yang berikatan dengan rantai tersebut. Hidrokarbon merupakan salah satu sumber energi paling penting di bumi, penggunaan yang utama merupakan sebagai sumber bahan bakar. Dalam bentuk padat hidrokarbon merupakan salah satu komposisi pembentuk aspal. Hidrokarbon yang berwujud gas metana dan etana dalam suhu ruangan dan tidak mudah untuk dicairkan dengan tekanan. Propana lebih mudah untuk dicairkan dan biasanya dijual dalam tabung-tabung dalam bentuk cair. Isolator gas hidrokarbon memiliki beberapa jenis bahan isolasi diantaranya adalah,

1) Metana

Metana adalah metana, gas tidak berwarna, tidak berbau yang banyak terdapat di alam dan sebagai produk aktivitas manusia tertentu. Metana adalah anggota paling sederhana dari rangkaian hidrokarbon parafin dan merupakan salah satu gas rumah kaca yang paling kuat. Rumus kimianya adalah CH_4 .

2) Etana

Etana adalah gas hidrokarbon gas yang tidak berwarna, tidak berbau, (senyawa hidrogen dan karbon), yang termasuk dalam seri parafin; rumus kimianya adalah C_2H_6 . Etana secara struktural adalah hidrokarbon paling sederhana yang mengandung ikatan karbon-karbon tunggal. Konstituen terpenting kedua dari gas alam, juga terjadi terlarut dalam minyak bumi dan sebagai produk sampingan dari operasi kilang minyak dan karbonisasi batubara.

3) Propana

Gas propana adalah hidrokarbon gas yang tidak berwarna, mudah dicairkan (senyawa karbon dan hidrogen), anggota ketiga dari seri parafin setelah metana dan etana. Rumus kimia propana adalah C_3H_8 . Ini dipisahkan dalam jumlah besar dari gas alam, minyak mentah ringan, dan gas penyulingan minyak dan tersedia secara komersial sebagai propana cair atau sebagai konstituen utama gas LPG.

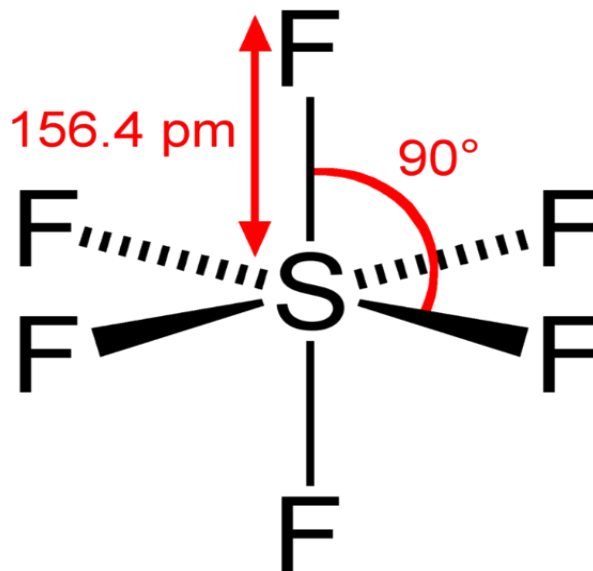
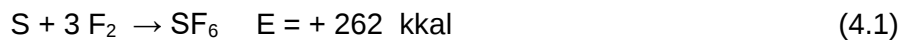
i. Gas Elektronegatif

Gas elektronegatif merupakan gas yang banyak digunakan di lingkungan Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai media isolasi dan pendingin pada ruang (*chamber*) pemutus PMT atau pada kompartemen-kompartemen Gas *Insulation Substation* (GIS).

j. Sulphur Hexa Fluorida

Sulphur Hexa Fluorida atau SF_6 adalah isolator listrik yang sangat baik dan secara efektif dapat memadamkan busur, yang membuat apparatus tegangan tinggi. SF_6 dapat ditemukan pada jutaan peralatan listrik di seluruh dunia, contoh peralatan listrik yang mengandung SF_6 adalah pengaman busur di circuit breaker. Gas SF_6 dibentuk oleh reaksi kimia antara belerang cair dan fluor. Fluor diperoleh dengan elektrolisis asam hidrofiorat (HF). Gas SF_6 murni tidak beracun. Gas tidak berbahaya untuk dihirup, asalkan kandungan oksigennya cukup tinggi. Pada prinsipnya manusia dapat menghirup

campuran 20% oksigen dan 80% SF₆ tanpa bahaya. SF₆ sekitar 6 kali lebih berat dari udara, hal itu berarti bahwa SF₆ dapat terkumpul di saluran kabel atau di bagian bawah tangki. SF₆ tidak berbahaya untuk dihirup tetapi jika terakumulasi pada ruangan tempat bekerja, ada risiko mati lemas karena kekurangan oksigen. SF₆ adalah gas yang tidak mudah terbakar yang digunakan dalam peralatan listrik. Unsur sulfur dengan fluor terjadi reaksi eksotermis membentuk Sulphur Hexa Fluorida (SF₆). Penggunaan paling umum untuk SF₆, baik domestik maupun internasional adalah sebagai isolator listrik pada peralatan bertegangan tinggi yang mentransmisikan dan mendistribusikan listrik. Sejak medio 1990, industri tenaga listrik di Asia telah menggunakan SF₆ secara luas dalam pemutus sirkuit, gardu gas yang diinsulasi, dan switchgear lain yang digunakan dalam sistem transmisi untuk mengelola tegangan tinggi yang diangkut antara stasiun pembangkit dan pusat beban pelanggan. Gambar 4.2. menunjukkan ilustrasi untuk molekul SF₆.



Gambar 4.2. Ilustrasi Molekul SF₆

Ilustrasi Gambar 4.2 menunjukkan molekul SF₆ memiliki struktur kristal orthorombik dengan 6 atom fluor yang mengelilingi sebuah atom sulfur. Setiap atom Fluor mengikat 1 buah elektron terluar atom sulfur. Dengan

demikian molekul SF₆ serupa dengan gas yang inert atau stabil seperti halnya gas mulia. Gas SF₆ masih menduduki posisi sebagai gas terberat dengan densitas sebesar 6,139 kg/m³ hingga saat ini. Densitas ini 5 kali dari berat udara pada temperatur 100° C pada tekanan 1 atm. Karakteristik lainnya adalah tidak larut pada air namun terlarut dalam etanol, heksana dan benzena, tidak beracun, tidak terbakar, tidak berbau dan tidak berwarna. Gas SF₆ memiliki kemampuan isolasi yang baik yaitu 2,5 kali dari udara. Berikut ini adalah perbandingan karakteristik gas SF₆ dengan beberapa gas lainnya.

Tabel 4.1. Sifat Beberapa Gas

Gas	Massa Jenis (kg/m ³)	Konduktivitas Panas (W/m)	Tegangan Tembus (kV/cm)
Udara	1,228	$5,0 \times 10^{-6}$	30
SF ₆	6,139	$1,9 \times 10^{-5}$	75
Nitrogen (N ₂)	1,191	$5,4 \times 10^{-6}$	30
Karbon Dioksida	1,867	$3,2 \times 10^{-6}$	27
Hidrogen	0,086	$3,3 \times 10^{-5}$	18

Energi yang dibutuhkan untuk mendisosiasi gas SF₆ menjadi unsur sulfur dan flour sekitar 262 kkal/molekul. Besarnya energi yang diperlukan untuk mendisosiasi gas ini, sehingga dapat digunakan sebagai pendingin pada peralatan listrik yang menimbulkan panas atau bunga api. Peralatan listrik yang umumnya memanfaatkan gas ini adalah skafel pemutus beban. Karakteristik gas SF₆ yang digunakan sebagai media pemadam busur api adalah

- 1) Tingginya energi yang dibutuhkan untuk mendisosiasi gas SF₆, pemadaman busur api dapat terjadi langsung tanpa memerlukan energi tambahan
- 2) Pendeteksian gas SF₆ sebagai pemadam busur api maupun sebagai pengisolasi sangat mudah dilakukan.

- 3) Tidak menimbulkan residu dari unsur yang terlibat dari gas SF₆ (tidak ada sisa unsur pembentuknya)
- 4) Konduktivitas listrik akan tetap rendah meskipun mengalami ionisasi, sehingga sangat efektif dalam memutus arus listrik.
- 5) karakteristik penguraian gas SF₆ yang elektro negatif akan menjadikan dielektriknya naik secara bertahap.
- 6) Selama operasi pemutusan transien frekuensi tinggi akan meningkat. Busur api akan dipadamkan pada saat nilai arusnya rendah.

C. Latihan Soal

1. Jelaskan bagaimana karakteristik dielektrik dari gas!
2. Bandingkan sifat isolasi antara udara dengan nitrogen!

D. Daftar Pustaka

- Dekker, A. J. (1959). Electrical engineering materials. Prentice Hall.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Jain, G. C. (1967). Properties of electrical engineering materials.
- Listrik, B. P. U. I. 2011. Standar Nasional Indonesia. SNI, 225, 2011.
- Martinez-Vega, J. (Ed.). (2013). Dielectric materials for electrical engineering. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, 1981, A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 5

BAHAN POLIMER

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan struktur atom dan molekul serta menjelaskan karakteristik bahan polimer.

B. Uraian Materi

1. Isolator polimer

Polimer adalah salah satu kelas zat alami atau sintetis yang terdiri dari molekul yang sangat besar, yang disebut makromolekul, yang merupakan kelipatan dari unit kimia yang lebih sederhana yang disebut monomer. Polimer membuat banyak bahan dalam organisme hidup, termasuk, misalnya, protein, selulosa, dan asam nukleat. Selain itu, mereka merupakan dasar dari mineral seperti berlian, kuarsa, dan feldspar dan bahan buatan seperti beton, kaca, kertas, plastik, dan karet. Kata polimer menunjukkan jumlah unit monomer yang tidak ditentukan. Ketika jumlah monomer sangat besar, senyawa tersebut kadang disebut polimer tinggi. Polimer tidak terbatas pada monomer dengan komposisi kimia atau berat molekul dan struktur yang sama. Beberapa polimer alam tersusun dari satu jenis monomer. Kebanyakan polimer alami dan sintetis, bagaimanapun, terdiri dari dua atau lebih jenis monomer yang berbeda; polimer semacam itu dikenal sebagai kopolimer. Polimer organik memainkan peran penting dalam makhluk hidup, menyediakan bahan struktural dasar dan berpartisipasi dalam proses kehidupan yang vital. Misalnya, bagian padat dari semua tanaman terbuat dari polimer. Ini termasuk selulosa, lignin, dan berbagai resin. Selulosa adalah polisakarida, polimer yang terdiri dari molekul gula. Lignin terdiri dari jaringan polimer tiga dimensi yang rumit. Resin kayu adalah polimer dari hidrokarbon sederhana, isoprena. Polimer isoprena lain yang dikenal adalah karet. Polimer alami penting lainnya termasuk protein, yang merupakan polimer asam amino, dan asam nukleat, yang merupakan polimer nukleotida molekul kompleks yang terdiri dari basa yang mengandung nitrogen, gula, dan asam

fosfat. Asam nukleat membawa informasi genetik di dalam sel. Pati, sumber penting energi makanan yang berasal dari tumbuhan, adalah polimer alami yang terdiri dari glukosa.

Banyak polimer anorganik juga ditemukan di alam, termasuk berlian dan grafit. Keduanya terdiri dari karbon. Dalam berlian, atom karbon dihubungkan dalam jaringan tiga dimensi yang memberikan material kekerasannya. Dalam grafit, yang digunakan sebagai pelumas dan dalam timah pensil, atom karbon terhubung dalam bidang yang dapat meluncur satu sama lain. Sederhana, seperti etilena dan propilena, dapat diubah menjadi polimer dengan menambahkan satu demi satu monomer ke rantai yang sedang tumbuh. Polietilen, terdiri dari monomer etilen berulang, adalah polimer tambahan. Ini mungkin memiliki sebanyak 10.000 monomer bergabung dalam rantai melingkar panjang. Polietilen berbentuk kristal, tembus cahaya, dan termoplastik yaitu, melunak saat dipanaskan. Ini digunakan untuk pelapis, pengemasan, bagian cetakan, dan pembuatan botol dan wadah. Polypropylene juga kristal dan termoplastik tetapi lebih keras dari polietilen. Molekulnya dapat terdiri dari 50.000 hingga 200.000 monomer. Senyawa ini digunakan dalam industri tekstil dan untuk membuat benda cetakan. Polimer adisi lainnya termasuk polibutadiena, poliisoprena, dan polikloroprena, yang semuanya penting dalam pembuatan karet sintesis. Beberapa polimer, seperti polistirena, seperti kaca dan transparan pada suhu kamar, serta termoplastik. Polystyrene dapat diwarnai dengan warna apa pun dan digunakan dalam pembuatan mainan dan benda plastik lainnya. Jika satu atom hidrogen dalam etilena digantikan oleh atom klor, vinil klorida dihasilkan. Ini berpolimerisasi menjadi polivinil klorida (PVC), bahan termoplastik tidak berwarna, keras, tangguh, yang dapat diproduksi dalam berbagai bentuk, termasuk busa, film, dan serat. Vinil asetat, diproduksi melalui reaksi etilen dan asam asetat, berpolimerisasi menjadi resin lunak amorf yang digunakan sebagai pelapis dan perekat. Ini berkopolimerisasi dengan vinil klorida untuk menghasilkan keluarga besar bahan termoplastik. Banyak polimer penting memiliki atom oksigen atau nitrogen, bersama dengan atom karbon, dalam rantai tulang punggung. Diantara bahan makromolekul seperti itu dengan atom oksigen adalah poliasetal. Poliasetal yang paling sederhana adalah poliformaldehida. Ini memiliki titik leleh tinggi dan kristal dan tahan terhadap abrasi dan aksi pelarut. Resin asetal lebih mirip logam daripada plastik lainnya dan digunakan dalam pembuatan bagian-bagian mesin seperti roda gigi dan bantalan. Polimer linier

yang dicirikan oleh pengulangan gugus ester di sepanjang rantai tulang punggung disebut poliester. Poliester rantai terbuka tidak berwarna, kristal, bahan termoplastik. Mereka dengan berat molekul tinggi (10.000 hingga 15.000 molekul) digunakan dalam pembuatan film, benda cetakan, dan serat seperti Dacron.

Poliamida termasuk kasein protein alami, ditemukan dalam susu, dan zein, ditemukan dalam jagung, dari mana plastik, serat, perekat, dan pelapis dibuat. Di antara poliamida sintetis adalah resin urea-formaldehida, yang termoset. Mereka digunakan untuk memproduksi benda cetakan dan sebagai perekat dan pelapis untuk tekstil dan kertas. Juga penting adalah resin poliamida yang dikenal sebagai nilon. Mereka kuat, tahan terhadap panas dan abrasi, tidak mudah terbakar, dan tidak beracun, dan dapat diwarnai. Penggunaannya yang paling terkenal adalah sebagai serat tekstil, tetapi mereka memiliki banyak aplikasi lain. Keluarga penting lainnya dari polimer organik sintetis terbentuk dari pengulangan linier dari kelompok uretan. Poliuretan digunakan dalam pembuatan serat elastomer yang dikenal sebagai spandeks dan dalam produksi dasar pelapis dan busa lunak dan kaku. Kelas polimer yang berbeda adalah campuran senyawa organik-anorganik. Perwakilan paling penting dari keluarga polimer ini adalah silikon. Tulang punggung mereka terdiri dari atom silikon dan oksigen bergantian dengan kelompok organik yang melekat pada masing-masing atom silikon. Silikon dengan berat molekul rendah adalah minyak dan lemak. Spesies dengan berat molekul lebih tinggi adalah bahan elastis serbaguna yang tetap lembut dan kenyal pada suhu yang sangat rendah. Mereka juga relatif stabil pada suhu tinggi. Polimer yang mengandung fluorokarbon, yang dikenal sebagai fluoropolimer, terdiri dari ikatan karbon-fluorin, yang sangat stabil dan membuat senyawa tahan terhadap pelarut. Sifat ikatan karbon-fluorin selanjutnya memberikan kualitas antilengket pada fluoropolimer; ini paling banyak terbukti dalam Teflon polytetrafluoroethylene (PTFE). Studi bahan tersebut terletak dalam domain kimia polimer. Penelitian polimer alam tumpang tindih jauh dengan biokimia, tetapi sintesis polimer baru, penyelidikan proses polimerisasi, dan karakterisasi struktur dan sifat bahan polimer semuanya menimbulkan masalah unik bagi ahli kimia polimer. Ahli kimia polimer telah merancang dan mensintesis polimer yang bervariasi dalam kekerasan, fleksibilitas, suhu pelunakan, kelarutan dalam air, dan biodegradabilitas. Mereka telah menghasilkan bahan polimer yang sekuat baja namun lebih ringan dan lebih tahan terhadap korosi. Pipa minyak, gas alam,

dan air sekarang secara rutin dibangun dari pipa plastik. Dalam beberapa tahun terakhir, pembuat mobil telah meningkatkan penggunaan komponen plastik untuk membuat kendaraan yang lebih ringan yang mengkonsumsi lebih sedikit bahan bakar. Industri lain seperti yang terlibat dalam pembuatan tekstil, karet, kertas, dan bahan kemasan dibangun di atas kimia polimer. Selain memproduksi jenis bahan polimer baru, para peneliti juga mengembangkan katalis khusus yang dibutuhkan oleh sintesis industri skala besar dari polimer komersial. Tanpa katalis seperti itu, proses polimerisasi akan sangat lambat dalam kasus-kasus tertentu.

Bahan yang termasuk polimer antara lain diantaranya kayu, karet, kapas, wol, kulit dan sutra. Bahan polimer alam lainnya seperti protein, senzim dan selulosa merupakan bahan yang sangat penting dalam proses biologi dan fisiologi dalam tanaman dan hewan. Saat ini banyak polimer yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari dalam bentuk plastik. Plastik dibentuk dari bahan perekat seperti damar atau resin dan bitumen.

Polimer merupakan bahan gabungan dari suatu unit terkecil yang disebut mer. Parameter yang menyatakan ukuran suatu polimer adalah bobot molekulnya. Semakin tinggi bobot molekul artinya suatu polimer akan memiliki rantai yang semakin panjang. Parameter lainnya yang digunakan untuk menyatakan rantai polimer ini adalah derajat polimerisasi. Untuk bobot molekul polimer ada dua parameter berbeda yaitu:

- a. Bobot molekul rata-rata Bilangan

$$\overline{M}_n = \sum x_i M_i \quad (5.1)$$

Dimana M_i merupakan rata-rata (nilai tengah) bobot molekul dan x_i adalah fraksi bilangan dari keseluruhan rantai.

- b. Bobot molekul rata-rata Berat

$$\overline{M}_w = \sum w_i M_i \quad (5.2)$$

Dimana M_i merupakan rata-rata (nilai tengah) bobot molekul dan w_i adalah fraksi berat dari keseluruhan rantai.

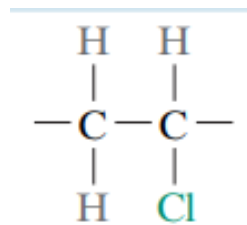
- c. Derajat Polimerisasi menggambarkan nomor rata-rata unit “mer” dalam rantai polimer.

$$DP = \frac{\overline{M}_n}{m} \quad (5.3)$$

Dimana $\overline{M}_n$ merupakan bobot molekul rata-rata bilangan dan m adalah bobot molekul dari unit “mer” yang berulang.

Contoh soal:

Hitunglah rata-rata bilangan, rata-rata berat bobot molekul dan derajat polimerisasi dari polimer poly (*vinyl chloride*). Bila diketahui monomer dari poly (*vinyl chloride*) adalah,



Gambar 5.1 monomer dari poly (*vinyl chloride*).

Diketahui bobot molekul, fraksi bilangan dan dan fraksi berat dari poly (*vinyl chloride*). Penilaian mengenai rentang bobot molekul, nilai tengah bobot molekul, fraksi bilangan dan fraksi berat dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Bobot Molekul

Rentang Bobot Molekul (g/mol)	Nilai tengah Bobot Molekul (g/mol)	Fraksi Bilangan	Fraksi berat
(1)	(2)	(3)	(4)
5000 - 10000	7500	0.05	0.02
10000 - 15000	12500	0.16	0.10
15000 - 20000	17500	0.22	0.18
20000 - 25000	22500	0.27	0.29
25000 - 30000	27500	0.20	0.26
30000 - 35000	32500	0.08	0.13

Rentang Bobot Molekul (g/mol)	Nilai tengah Bobot Molekul (g/mol)	Fraksi Bilangan	Fraksi berat
35000 - 40000	37500	0.02	0.02

Bilangan rata-rata bobot molekul dihitung dari jumlah perkalian tiap baris dari kolom (2) dengan kolom (3)

$$\overline{M}_n = 375 + 2000 + 3850 + 6075 + 5500 + 2600 + 750 = 21510 \text{ g/mol}$$

Berat rata-rata bobot molekul dihitung dari jumlah perkalian tiap baris dari kolom (2) dengan kolom (4)

$$\overline{M}_w = 150 + 1250 + 3150 + 6525 + 7150 + 4225 + 750 = 23200 \text{ g/mol}$$

Sedangkan untuk derajat polimerisasi, untuk menghitung m lihat pada Gambar 1.1, terdapat 3 unsur H, 2 unsur C dan 1 unsur Cl

$$m = 3 (1.01 \text{ g/mol}) + 2 (12.01 \text{ g/mol}) + 35.45 \text{ g/mol} = 62.50 \text{ g/mol}$$

$$\text{sehingga DP} = 21150 / 62.50 = 338$$

2. Jenis Polimerisasi

Polimerisasi adalah proses bereaksi molekul monomer bersama dalam reaksi kimia untuk membentuk tiga dimensi jaringan atau rantai polimer. Polimerisasi terbagi dalam dua jenis

a. Polimerisasi Adisi

Polimerisasi adisi adalah proses penambahan berulang monomer yang memiliki ikatan rangkap dua atau rangkap tiga untuk membentuk polimer.

b. Polimerisasi Kondensasi

Polimerisasi kondensasi adalah proses yang melibatkan reaksi kondensasi berulang antara dua monomer bi-fungsional atau tri-fungsional yang berbeda.

Berikan di bawah ini dalam kolom tabel adalah perbedaan antara polimerisasi adisi dan kondensasi..

3. Kategori Polimer

Polimer terbagi menjadi tiga kategori, polimer *thermoplastic* dan polimer *thermosetting* adalah polimer yang dikategorikan sebagai plastik, sedangkan elastomer adalah polimer yang dikategorikan sebagai karet.

a. Polimer *Thermoplastic*.

Polimer *thermoplastic* adalah polimer termoplastik adalah bahan plastik yang dapat dibentuk atau dibentuk kembali dengan pemanasan. Bahan ini menjadi lunak ketika mengalami proses pemanasan. Dapat dipanaskan kembali beberapa kali sampai terbentuk cetakan yang sempurna. Setelah termoplastik mendingin, ia berubah menjadi bentuk baru dengan hasil akhir yang halus namun keras. Saat ini, polimer termoplastik memiliki beberapa kegunaan. Ini adalah bahan yang dapat ditemukan di benda-benda yang paling sering digunakan termasuk helm pengaman, botol pemeras, lensa akrilik, cangkir busa dan sejenisnya. Termoplastik sangat dapat didaur ulang. Bahan ini mampu menahan beberapa pemanasan dan pencetakan. Karena kemampuan bahan-bahan ini untuk dipanaskan, dilebur, dan dibentuk kembali tanpa mengubah sifat-sifatnya, polimer termoplastik seperti wadah rumah tangga dan botol plastik dapat diarde, dipanaskan, dimurnikan, dan digunakan kembali. Titik leleh termoplastik adalah pada 120 hingga 180 derajat Celcius. Pada suhu ini, bahan plastik berubah menjadi bentuk pucat cair. Dengan mengubahnya menjadi bentuk cair, ia dapat dicor menjadi berbagai jenis bentuk dan digunakan untuk membuat objek berguna lainnya. Contoh bahan termoplastik termasuk polistirena, polivinil klorida dan polietilen di antara banyak lainnya. Ini sering digunakan untuk bahan kemasan. Jenis lain dari polimer termoplastik termasuk nilon, akrilik, poliester, dan lainnya. Karena sifat pelumasan sendiri dan ketahanan abrasi, nilon biasanya digunakan untuk membuat ritsleting, tali pancing, dan tali. Dengan kekuatan dan ketahanan benturannya, polietilen adalah bahan yang umum digunakan untuk membuat mainan dan ember. PVC atau polivinil klorida di sisi lain, dapat diubah menjadi pipa selang, ubin lantai dan pelapis kabel sementara akrilik digunakan untuk lensa, jendela dan kaca mata.

b. Polimer *Thermosetting*.

Polimer *thermosetting* adalah polimer yang mengeras secara ireversibel oleh panas. Plastik termoset juga dikenal sebagai termoset, polimer termoset, atau resin termoset. Bahan awal untuk termoset adalah cairan atau padatan lunak. Panas menyediakan energi untuk pembentukan ikatan kovalen, ikatan silang subunit polimer dan pengawetan/pengerasan plastik. Kadang-kadang panas diterapkan dari luar, tetapi mungkin berasal dari reaksi kimia bahan-bahan pencampuran. Menambahkan tekanan, katalis, atau pengeras dapat meningkatkan laju curing. Setelah disembuhkan, plastik termoset tidak dapat dicairkan kembali, sehingga dibentuk menjadi bentuk akhirnya dengan pencetakan injeksi, pencetakan ekstrusi, pencetakan kompresi, atau pengecoran putar. Plastik ini yang banyak kita jumpai dalam kehidupan sehari-hari adalah plastik *thermosetting*. Contohnya meliputi bakelite (fenolik), ester sianat, duroplast, resin epoksi, fiberglass (termoset yang diperkuat serat), melamin, resin poliester, poliuretan, resin silikon, vinil ester, karet divulkanisir. Panas membuat plastik termoset menjadi kaku secara ireversibel, tetapi panas membuat termoplastik dapat dibentuk atau lentur. Sebuah termoplastik kemudian mengeras lagi setelah pendinginan. Plastik termoset cenderung lebih kuat daripada termoplastik karena ikatan silang internal melalui ikatan kovalen. Untuk alasan yang sama, plastik termoset cenderung memiliki ketahanan korosi dan kekerasan yang lebih tinggi. Di sisi lain, termoset lebih cenderung berubah bentuk secara permanen di bawah beban dan lebih rapuh daripada termoplastik. Termoset tidak dapat dibentuk kembali, tetapi sangat cocok untuk aplikasi suhu tinggi, termasuk elektronik dan peralatan. Termoplastik dapat dicetak ulang dan didaur ulang. Kekuatan, fleksibilitas, dan ketahanannya terhadap susut membuatnya cocok untuk suku cadang bertekanan tinggi serta kantong dan wadah plastik..

c. Elastomer.

Elastomer (E) adalah Elastomer (karet) adalah polimer khusus yang sangat elastis. Mereka sedikit terikat silang dan amorf dengan suhu transisi gelas jauh di bawah suhu kamar. Mereka dapat dibayangkan sebagai satu molekul yang sangat besar dengan ukuran makroskopik. Gaya antarmolekul antara rantai polimer agak lemah. Ikatan silang sepenuhnya menekan aliran ireversibel tetapi rantai sangat fleksibel pada suhu di atas transisi kaca, dan gaya yang kecil menyebabkan deformasi yang besar (lihat juga elastisitas karet). Dengan demikian, elastomer memiliki modulus Young yang rendah dan perpanjangan

putus yang sangat tinggi. jika dibandingkan dengan polimer lainnya. Istilah elastomer sering digunakan secara bergantian dengan istilah karet, meskipun yang terakhir lebih disukai bila mengacu pada karet vulkanisir. Elastomer dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok besar: diena, non-diena, dan elastomer termoplastik. Elastomer diena dipolimerisasi dari monomer yang mengandung dua ikatan rangkap berurutan. Contoh umum adalah poliisoprena, polibutadiena, dan polikloroprena. Elastomer nondiena meliputi, karet butil (poliisobutilena), polisiloksan (karet silikon), poliuretan (spandeks), dan fluoro-elastomer. Elastomer non-diena tidak memiliki ikatan rangkap dalam strukturnya, dan dengan demikian, pengikatan silang memerlukan metode lain selain vulkanisasi seperti penambahan monomer trifungsional (polimer kondensasi), atau penambahan monomer divinil (polimerisasi radikal bebas), atau kopolimerisasi dengan sejumlah kecil diena. monomer seperti butadiena. Elastomer termoplastik seperti kopolimer blok SIS dan SBS dan uretan tertentu adalah termoplastik dan mengandung unit berulang yang kaku (keras) dan lunak (karet). Ketika didinginkan dari keadaan meleleh ke suhu di bawah suhu transisi gelas, fase blok keras terpisah untuk membentuk domain kaku yang bertindak sebagai ikatan silang fisik untuk blok elastomer. Manufaktur bagian elastomer dicapai dengan salah satu dari tiga cara: pencetakan injeksi, pencetakan transfer, atau pencetakan kompresi. Pilihan proses pencetakan tergantung pada berbagai faktor, termasuk bentuk dan ukuran bagian, toleransi yang diperlukan, serta jumlah, jenis elastomer, dan biaya bahan baku. Seperti hampir semua bahan, memilih produk elastomer yang tepat untuk aplikasi memerlukan pertimbangan banyak faktor, termasuk persyaratan layanan mekanis dan fisik, paparan bahan kimia, suhu operasi, masa pakai, kemampuan manufaktur suku cadang, dan bahan baku dan biaya produksi..

4. Penggolongan Beberapa Kelompok Polimer

a. Penggolongan Berdasarkan Asal Polimer.

1) Polimer Alam

Polimer alam adalah polimer yang tersedia secara alami di alam tanpa proses pembuatan. Contoh polimer alam adalah karet alam (dari monomermonomer 2-metil-1, 3-butadiena/isoprena), selulosa (dari

monomer-monomer glukosa), protein (dari monomer-monomer asam amino) dan amilum.

2) Polimer Sintetik

Polimer sintetik adalah polimer buatan hasil sintetis indukstri/pabrikasi. Contoh polimer sintetik adalah nilon (dari asam adipat dengan heksametilena), PVC (dari vinil klorida), polietilena dan poliester (dari diasil klorida dengan alkanadiol).

b. Penggolongan Berdasarkan Jenis Monomer

1) Homopolimer

Homopolimer adalah jenis polimer yang terbentuk dari monomer-monomer yang sejenis. Contoh dari homopolimer adalah polisterina, polipropilena, selulosa, PVC, teflon.

2) Kopolimer

Kopolimer terbentuk dari monomer-monomer yang tidak sejenis. Contoh dari kopolimer adalah nilon 66, tetoron, dakron, protein (dari berbagai macam asam amino), DNA (dari pentosa, basa nitrogen, dan asam fosfat), bakelit (dari fenol dan formaldehida) dan melamin (dari urea dan formaldehida).

c. Penggolongan Berdasarkan Penggunaan Polimer

1) Serat

Polimer yang dimanfaatkan sebagai serat. Misalnya untuk kain dan benang. Contoh polimer serat adalah poliester, nilon, dan dakron.

2) Plastik

Polimer yang dimanfaatkan untuk plastik. Contoh polimer plastik adalah bakelit, polietilena, PVC, polisterina, dan polipropilena.

d. Penggolongan Berdasarkan Sifatnya Terhadap Panas

1) Polimer Termoplas/Termoplastis

Polimer termoplas/termoplastis adalah polimer yang melunak ketika dipanaskan dan dapat kembali ke bentuk semula. Contoh polimer termoplas/termoplastis adalah PVC, polietilena, polipropilena.

2) Polimer Termosetting

Polimer termosetting adalah polimer yang tidak melunak ketika dipanaskan dan tidak dapat kembali ke bentuk semula. Contoh Polimer termosetting adalah melamin, selulosa.

a. Karet

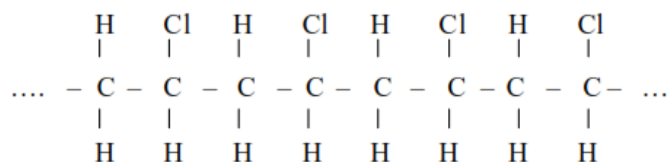
Karet terbuat dari getah *Hevea Braziliensis* yang menghasilkan karet terbanyak dengan kualitas tinggi. Vulkanisasi merupakan teknik penambahan sulfur dan bahan lainnya ke dalam karet. Teknik vulkanisasi dilakukan dengan pemanasan sehingga terbentuk uap sehingga dapat mencegah terbentuknya pori-pori selama proses. Bahan perekat kulit dan karet dibuat dari karet kasar yang dicampur dengan bensin. Dalam teknik listrik karet yang bersifat sebagai isolator listrik yang digunakan sebagai penyekat, sepatu kabel dan perangkat pemasangan instalasi listrik.

b. Ebonit

Merupakan karet yang dicampur dengan belerang dan bahan tambahan lainnya diantara 30 sampai 50% melalui proses vulkanisasi yang lama. Dari proses tersebut akan diperoleh bahan dengan kekerasan yang tinggi. Ebonit diperjualbelikan dalam bentuk berupa lempeng, batang atau pipa dengan berbagai ukuran. Ebonit banyak digunakan untuk keperluan elektrik dan komponen peralatan teknik karena mempunyai keunggulan sifat kuat, rigid dan tahan pukulan/benturan. Pada formulasi kompon untuk karet ebonit, dapat dicampurkan karet riklim dalam jumlah yang cukup tinggi, karena selain untuk menekan harga juga dapat memberikan waktu vulkanisasi yang lebih cepat dari pada tanpa riklim.

c. Polivinilklorida (PVC)

Bahan ini merupakan hasil polimerisasi dari vinilklorida $H_2C=CHCl$. Ikatan ganda yang melekat pada molekul vinilklorida diubah menjadi ikatan tunggal selama proses polimerisasi. Molekul vinilklorida akan saling mengikat sehingga timbul molekul makro PVC yang Panjang.



Gambar 5.2 Rantai PVC.

PVC memiliki karakteristik yang keras dan rapuh pada temperatur kamar. Untuk menjadikannya lentur dan tidak rapuh sehingga dapat digunakan sebagai isolator kabel PVC ditambahkan bahan pelunak. Besaran penambahan berkisar 20 hingga 40%. PVC memiliki densitas sebesar 1,4

g/cm^3 dan berkisar antara 1,25 – 1,55 g/cm^3 setelah diberi pelunak. PVC memiliki ketahanan terhadap bahan kimia yang cukup baik. PVC memiliki kekurangan terhadap tekanan, dan akan semakin menurun bila temperatur dinaikkan. Temperatur maksimum penggunaan PVC secara terus menerus sebesar 70° C. Penambahan bahan pelunak khusus dapat meningkatkan temperatur penggunaan PVC hingga mencapai 105° C.

d. Polietilen (PE)

Polimer ini merupakan hasil polimerisasi dari etilen $\text{H}_2\text{C} = \text{CH}_2$. Karakteristik listrik PE lebih baik dari pada PVC. Kelemahan dari PE yaitu mudah terbakar, dan sulit untuk dipadamkan meski sumber apinya disingkirkan. Bahan ini tidak digunakan untuk kabel arus kuat, kecuali jenis crosslinked polyethylene (XLPE). Karakteristik PE pada frekuensi tinggi sangat baik, sehingga digunakan pada kabel telekomunikasi. Kelebihan lainnya dibandingkan dengan PVC adalah tidak mudah menyerap air, dan tahanan isolasinya tidak akan menurun bila digunakan pada tempat yang lembab atau basah.

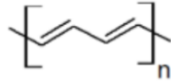
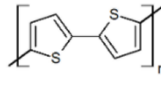
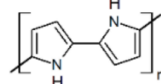
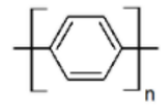
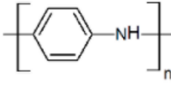
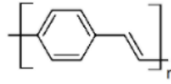
Konstanta dielektrik dari polimer berasal dari polarisasi elektronik dan orientasi molekuler. Orientasi molekuler bisa saja satu-satunya polarisasi yang terjadi. Orientasi molekuler bisa menjadi satu faktor yang berpengaruh pada frekuensi di bawah $\sim 10^8$ Hz. Proton dari atom-atom hidrogen sampingnya dan gugus-gugus polar seperti $\text{C}\equiv\text{O}$, $\text{C}\equiv\text{N}$ dan $-\text{Cl}$ menanggapi medan listriknya. Hal ini terjadi di atas temperatur gelasnya.

e. Polimer Konduktif

Polimer dapat menjadi konduktif ditemukan diakhir tahun 1977 yang pada saat itu polimer digunakan sebagai isolator. Polimer konduktif ini memiliki keunggulan dibandingkan dengan logam konduktor dari sisi kimia yang memungkinkan adanya perpindahan ion, perilaku reaksi redoks, sifat katalitik, pengaruh elektrokimia, fotoaktivitas, dan pengaruh penghubung ikatan. Secara mekanik memiliki keunggulan, bobot yang ringan, fleksibel, dan memiliki karakteristik permukaan non logam. pada Tabel 5.2 disajikan beberapa jenis polimer yang bersifat konduktor listrik.

Tabel 5.2. Polimer Bersifat Konduktif

No	Jenis Polimer	Unit “mer”	Konduktivitas Listrik (S.cm^{-1})

1.	trans-Polyacetylene		$10^3 - 10^5$
2.	Polythiophene		10^3
3.	Polypyrrole		$10^2 - 7,5 \cdot 10^3$
4.	Poly (p-phenylene)		$10^2 - 10^3$
5.	Polyaniline		$2 \cdot 10^2$
6.	Poly (p-phenylene vinylene)		$2 \cdot 10^4$

Polimer tersebut dapat berubah menjadi konduktif setelah melalui beberapa proses, yaitu

1) Doping redoks

Polimer yang dapat diproses dengan teknik ini, harus memiliki kemungkinan untuk kehilangan elektron (reduksi) atau memperoleh elektron (oksidasi). Teknik ini dikenal juga dengan nama polimer transfer elektron atau polimer *electron-exchange*.

2) Doping elektrokimia

Proses ini, menggunakan katoda, arus listrik dan temperatur agar terjadi proses doping pada polimer sehingga dapat meningkatkan konduktivitas listriknya.

3) Doping induksi cahaya

Proses doping induksi cahaya dilakukan dengan memanfaatkan paparan cahaya ultra violet untuk proses doping.

Polimer konduktif ini telah banyak diimplementasikan dalam dunia industri dan telah digunakan oleh masyarakat luas. Penggunaan polimer konduktif digunakan sebagai sensor elektrokimia yang digunakan untuk menganalisis obat-obatan, polusi, dan kandungan makanan. Penggunaan sebagai penyimpan dan pengubah energi yang digunakan pada kapasitor super, sel surya, baterai ion litium dan *fuel cell*. Selain itu, dapat juga digunakan sebagai

inhibitor korosi, pelindung elektromagnetik, transistor, LED dan laser yang digunakan dalam televisi.

C. Latihan Soal

1. Sebutkan 5 jenis polimer yang termasuk kelompok polimer *thermoset*!
2. Sebutkan 5 jenis polimer yang termasuk kelompok polimer *thermoplastic*!
3. Hitunglah bobot molekul dari polimer berikut!
 - a. Polytetrafluoroethylene
 - b. Poly(methyl methacrylate)
 - c. Poly(ethylene terephthalate)
 - d. Nylon 6,6
4. Berikan contoh polimer berdasarkan penggolongannya!
5. Berikan contoh pengguna isolator polimer dalam kehidupan sehari-hari, minimal 5 contoh!

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Tajik, S., Beitollahi, H., Nejad, F. G., Shoaie, I. S., Khalilzadeh, M. A., Asl, M. S., ... & Shokouhimehr, M. (2020). Recent developments in conducting polymers: applications for electrochemistry. *RSC Advances*, 10(62), 37834-37856.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 6

BAHAN KERAMIK

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan struktur atom dan molekul, dan karakteristik bahan keramik. Menjelaskan bahan dielektrik dan karakteristik kelistrikannya.

B. Uraian Materi

1. Isolator Keramik

Isolator keramik adalah isolator non-konduktif yang terbuat dari tanah liat berpori merah, coklat, atau putih yang menyediakan jembatan antara komponen elektronik dan memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan kehilangan listrik yang konstan dan rendah. Mereka mudah dirawat dan tahan terhadap noda dan berbagai bentuk residu. Selama bertahun-tahun, keramik telah digunakan sebagai isolator listrik karena ketahanannya yang sangat tinggi terhadap arus listrik. Penggunaan isolator keramik secara luas dimulai pada 1950-an. Mereka lebih murah untuk dibuat dan lebih tangguh dan tahan lama terlepas dari kondisi iklim. Pembuatan isolator kaca berhenti pada 1960-an dan digantikan seluruhnya oleh isolator keramik pada 1970-an. Masih ada beberapa isolator kaca yang digunakan, tetapi hanya sebagian kecil. Isolator keramik ditemukan di berbagai aplikasi elektronik, dari pusat distribusi daya hingga telepon seluler. Bahan keramik sebagai insulasi disebabkan oleh sifat non-konduktivitas dan kekuatan mekaniknya yang luar biasa. Beberapa contoh isolator keramik dapat ditemukan pada saluran listrik, kabel koaksial, dan papan sirkuit untuk mencegah gelombang elektromagnetik (EM), bahaya kebakaran, lonjakan daya, dan korsleting. Banyaknya penggunaan isolator keramik karena kemampuannya menahan panas. Selain itu, mereka mudah dibuat dan dibentuk menjadi berbagai konfigurasi. Dalam banyak aplikasi, mereka adalah faktor utama dalam menjaga daya tetap terkendali. Isolator keramik digunakan untuk mendukung kabel pada utilitas atau tiang telepon. Isolator keramik penyangga kawat memiliki desain seperti payung untuk melindungi kabel dan bagian bawah isolator dari hujan atau

salju. Isolator penyangga kawat keramik adalah salah satu jenis isolator keramik tertua karena kemampuannya untuk bertahan dan menahan cuaca buruk. Isolator keramik tegangan mekanik dirancang untuk digunakan dalam kondisi di mana kabel atau kabel yang ditangguhkan menarik isolator. Seperti halnya isolator keramik pendukung, mereka digunakan dengan kabel overhead dan antena radio, dan saluran listrik. Mereka dapat ditempatkan di antara dua saluran listrik untuk memisahkannya. Isolator keramik tegangan mekanis sangat cocok untuk menjaga kabel tetap kencang dan lurus. Isolator keramik tiang termasuk isolator spool yang dipasang pada braket, yang dihubungkan ke bagian atas dan bawah spool dengan batang kecil yang melewati bagian tengah isolator. Mereka melekat pada dinding, tiang, tegak, atau permukaan dengan baut di tengah braket. Ketika sudut garis penghubung berubah, isolator keramik tiang menyesuaikan dan beradaptasi dengan perubahan. Tujuan utama dari isolator adalah untuk mengontrol aliran arus dan mencegahnya bergerak menuju bumi. Insulator keramik pengaman tetap terpasang dan menyediakan insulasi jika kabel terpotong dan jatuh ke tanah. Mereka ditempatkan sedemikian rupa sehingga mereka menjamin bahwa kabel tidak akan menyentuh tanah. Insulator keramik pengaman dihubungkan dengan cara yang berbeda tergantung pada kebutuhan aplikasi. Jika sebuah tiang jatuh, isolator keramik memastikan bahwa bagian bawah sistem tidak memiliki tegangan apa pun. Isolator keramik distribusi tegangan rendah dipasang secara vertikal atau horizontal menggunakan baut atau pada lengan silang. Desain isolator keramik distribusi tegangan khas mirip dengan isolator keramik tiang. Mereka digunakan di saluran udara dengan tegangan menengah hingga rendah. Penggunaan yang luas dari isolator keramik distribusi tegangan rendah adalah karena kekuatan dan keandalannya. Isolator keramik pada busi memaksa percikan untuk melompati celah untuk memulai pembakaran. Tegangan tinggi harus berpindah dari satu ujung busi ke ujung lainnya di busi. Isolasi keramik mencegah flashover ke massa kendaraan. Penggunaan isolator keramik pada busi disebabkan oleh temperatur leleh yang tinggi dan ekspansi termal yang rendah. Isolator keramik banyak digunakan dalam aplikasi di mana ada panas tinggi. Mereka mendukung elemen pemanas di oven, pemanas, dan tungku. Ketahanan keramik terhadap abrasi dan umur panjang serta kemampuannya untuk menahan bentuk dan ukurannya di bawah tekanan menjadikannya bahan insulasi yang sempurna untuk aplikasi yang dipanaskan. Di banyak pemanas, isolator keramik mendukung dan memisahkan

elemen pemanas. Mesin cuci lengan keramik isolasi listrik, juga dikenal sebagai mesin cuci bahu atau isolasi, memblokir arus listrik dan mencegah korosi galvanik. Mereka memiliki semua sifat dan karakteristik yang disukai dari isolator keramik tipikal dan dapat menahan suhu hingga 3000o F. Selain itu, desain khusus washer isolasi selongsong keramik membuatnya mampu menahan efek gas asam klorida dan asam nitrat. Banyaknya kegunaan isolator keramik telah membuat para insinyur perlu merancang dan mengembangkan konfigurasi isolator keramik agar sesuai dengan berbagai macam aplikasi. Meskipun ada banyak sekali penggunaan isolator keramik, jumlah jenisnya termasuk dalam beberapa kategori dasar. Jenis isolator keramik yang paling umum digunakan adalah pin, suspension, strain, dan shackle. Di luar keempat jenis tersebut terdapat varietas lain yang memberikan fungsi serupa tetapi memiliki perbedaan detail tertentu. Jenis Isolator Keramik:

a. Insulator keramik standoff

Insulator keramik standoff mencegah listrik melompat di antara bagian-bagian dan membatasi arus ke jalur yang benar. Mereka ditemukan di semua jenis situasi tetapi umumnya ditemukan sebagai pengatur arus di transformator. Insulator keramik standoff melindungi terhadap kerusakan daya dan mengurangi pemborosan energi. Seperti kebanyakan isolator keramik, isolator keramik standoff dapat menahan suhu tinggi yang diciptakan oleh resistor kecepatan rendah. Akibatnya, mereka adalah isolator yang sangat baik untuk memasang sekering atau kabel tugas berat dan datang dalam bentuk silinder yang bulat, persegi, atau persegi panjang.

b. Insulator Strain Keramik

Insulator keramik regangan dirancang untuk menahan tarikan kabel atau kabel listrik yang ditanggihkan. Mereka digunakan untuk mendukung antena overhead dan saluran listrik di mana ada ketegangan mekanis. Insulator keramik regangan dipasang di antara panjang kawat untuk mengisolasinya di tiang atau menara. Bentuk isolator keramik regangan meningkatkan ruang antara kabel dan kapasitas transfer beban isolator. Untuk antena radio dan saluran listrik, isolator keramik regangan menanggung tegangan fisik kabel.

c. Isolator Keramik Enam Suspensi

Insulator keramik suspensi digantung dari lengan silang menara atau struktur pendukung lainnya untuk membawa konduktor daya. Bagian utama dari sisa isolator keramik adalah cakram yang digantung di atas satu sama lain, disebut

sebagai string. Tautan logam menghubungkan senar isolator keramik suspensi.

d. Isolator Keramik Berongga

Insulator keramik berongga digunakan untuk busbar untuk transformator daya dan instrumen, busbar dinding, pemutus tenaga, pemutus tenaga, pemutus tenaga, terminal kabel. Mereka diproduksi dalam desain tubuh silinder, kerucut, atau bulat dalam berbagai diameter. Insulator keramik berongga memiliki ketahanan mekanik dan isolasi listrik yang tinggi.

e. Isolator Keramik Sekrup Lag

Isolator keramik sekrup lag menghubungkan kabel listrik ke tiang untuk menghindari kehilangan energi ke tiang. Tubuh isolator keramik terpasang pada sekrup kayu untuk kemudahan pemasangan. Isolator keramik sekrup lag biasanya digunakan pada tiang kayu dan memiliki daya tahan dan kekuatan keramik, menjadikannya ideal untuk penggunaan di luar ruangan di sepanjang garis pagar.

f. Isolator Keramik Tulang Anjing

Isolator keramik tulang anjing adalah isolator regangan yang digunakan untuk memasang kabel listrik dan mengisolasi kabel antenna. Mereka memiliki konstruksi bergaris untuk mengurangi kebocoran frekuensi radio (RF). Isolator keramik tulang anjing memiliki tubuh panjang dua hingga tiga inci dengan lubang tegak lurus di kedua ujungnya. Ribbing ditempatkan di antara lubang, seperti yang terlihat pada gambar di bawah. Ada beberapa jenis bahan yang digunakan untuk memproduksi isolator tulang anjing. Keramik dipilih karena daya tahannya dan masa pakainya yang lebih lama, yang menghilangkan kebutuhan akan penggantian yang konstan.

g. Keramik Tiang Sudut

Insulator keramik tiang sudut dirancang untuk menahan tegangan pada garis pagar yang disebabkan oleh penarikan pagar dari titik jangkarnya atau perubahan arah. Mereka juga digunakan sebagai titik terminasi garis pagar. Insulator keramik tiang sudut tersedia dalam berbagai bentuk dan ukuran agar sesuai dengan kebutuhan aplikasi dan mungkin memiliki alur untuk penyisipan kabel.

h. Insulator Keramik Multi-Alur

Insulator keramik multi-alur adalah variasi isolator yang digunakan pada tiang kayu untuk mengikat kabel listrik tanpa kehilangan energi ke tiang. Mereka

dapat digunakan dengan kawat baja atau aluminium dan sangat tahan lama dan dapat diandalkan dengan kinerja isolasi yang unggul. Desain isolator keramik multi-alur melindungi terhadap busur dan kehilangan listrik. Mereka dipasang dengan menempatkan sekrup atau paku di lubang tengah isolator.

2. Bahan Tambang Keramik

Bahan tambang merupakan bahan hasil bumi yang digali dan ditemukan dalam bentuk bijih. Untuk memperoleh bahan yang dapat digunakan diperlukan proses terlebih dahulu. Beberapa bahan tambang keramik sebagai berikut:

a. Batu Pualam

Dikenal juga sebagai batu kapur (CaCO_3) atau dolomit.

b. Asbes

Merupakan bahan berserat, mudah putus, baik digunakan untuk isolator listrik.

c. Mika

Memiliki karakteristik teknis yang baik dan banyak digunakan sebagai isolator listrik. Mineral yang tergolong pada mika ada beberapa yaitu:

1) Phlogopite.

Merupakan batuan yang tergolong mika berwarna kuning, kehijau-hijauan atau berwarna coklat kemerahan. Batuan ini mengandung kalium, silikat magnesium aluminium. Mineral ini terbesar ditemukan di Canada.

2) Lepidolite.

Merupakan batuan yang memiliki warna putih keabu-abuan atau berwarna merah jambu. Mineral ini mengandung lithium sangat banyak dan merupakan sumber sekunder untuk lithium.

3) Biotite.

Bahan tambang ini pada awalnya sebagai spesies mineral, namun saat ini digunakan untuk menggambarkan mika yang belum dianalisis. Biotite ini dikenal juga sebagai mika hitam.

4) Muscovite.

Bahan tambang ini merupakan jenis mika paling banyak ditemukan. Merupakan mineral kedua yang dapat ditemukan pada topas. Muscovite ini dikenal juga sebagai mika putih.

3. Kaca dan Porselin

Kaca dan porselin dikelompokkan sebagai bahan keramik. Kaca dan porselin merupakan turunan dari bahan mineral. Kedua bahan tersebut tidak terbentuk secara alamnya, karena harus melalui proses terlebih dahulu. Proses yang dilakukan antara lain pemanasan atau pembakaran, pengerasan dan pelumeran.

a. Kaca

Kaca merupakan bahan non kristalin yang komposisi umumnya adalah SiO_2 . Kaca umumnya dibentuk dengan pendinginan cepat dari bentuk lelehannya. Meskipun rapuh, gelas silika dapat digunakan untuk jangka waktu yang lama. Karakteristik refraktif, reflektif dan transmisi kaca sehingga sangat sesuai untuk digunakan sebagai bahan lensa, prisma dan optoelektronik. Sedangkan karakteristik dielektriknya membuat kaca sesuai digunakan sebagai isolator pada distribusi jaringan tegangan tinggi.

b. Porselen

Merupakan bahan keramik yang dibuat dengan memanaskan bahan seperti kaolin pada temperatur 1200°C hingga 1400°C . Porselen digunakan sebagai isolator yang diaplikasikan pada distribusi jaringan tegangan tinggi.

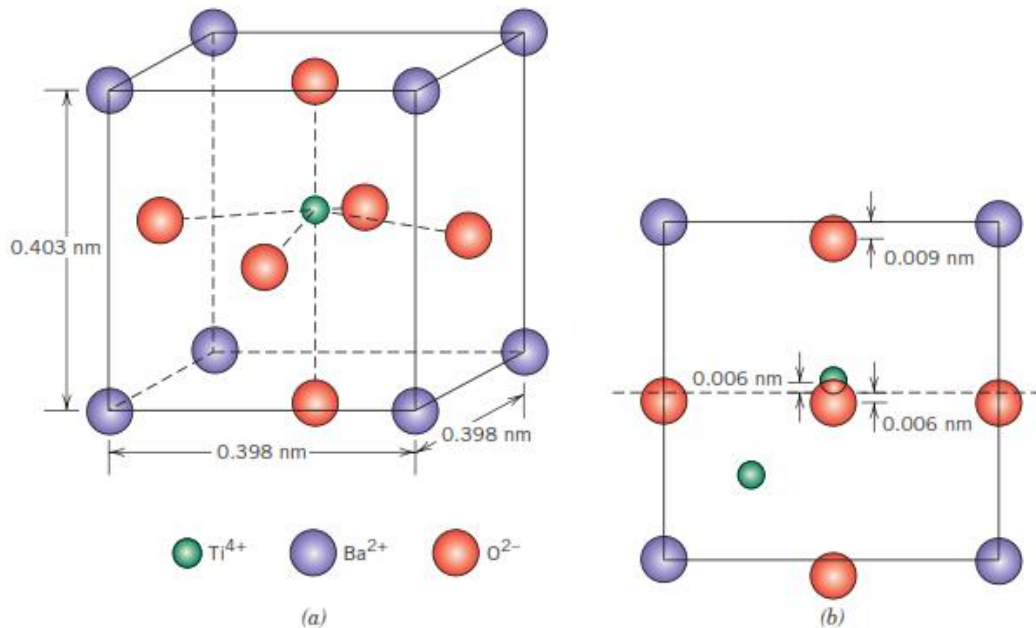
4. Penerapan Keramik Sebagai Isolator

Keramik banyak digunakan sebagai isolator listrik, dan sebagai substrat. Sifat-sifat yang biasanya dimiliki oleh keramik adalah resistivitas dan kekuatan-dielektrik yang tinggi. Konduktivitas panas juga penting dalam aplikasi-aplikasi dimana panas akan dihasilkan sehingga harus dibuang. Sebagai contoh, busi mesin mobil cukup panas untuk dapat melebur elektroda logam dari businya, tetapi tidak demikian kenyataannya karena isolator Al_2O_3 menghantarkan panas ke kulit logam dari busi tersebut. Serupa halnya, substrat untuk rangkaian komputer harus membuang panas yang dihasilkan oleh elemen-elemen operasi yang jumlahnya banyak. Alumina sangat sesuai untuk peran-peran ini, karena kedua elemen pada Al_2O_3 memiliki massa yang kecil, dan oleh sebab itu memiliki frekuensi vibrasi yang tinggi untuk melakukan konduksi termal yang cepat.

Umumnya, konstanta dielektrik untuk keramik lebih tinggi daripada konstanta dielektrik untuk polimer. Konstanta dielektrik keramik lebih konstan pada suatu rentang frekuensi. Akan tetapi, film plastik umumnya lebih mudah

dimodifikasi apabila digunakan untuk membuat kapasitor dan bagian-bagian elektronik yang serupa.

Molekul-molekul bahan polar memiliki dipol yang permanen. Selain itu, kristal tertentu memiliki dipol listrik yang permanen karena pusat muatan-positif dan pusat muatan-negatifnya bukan di pusat sel-satuan. Sel-sel satuan ini mengalami polarisasi. Salah satu contoh bahan seperti ini adalah BaTiO_3 .



Gambar 6.1. Struktur BaTiO_3 (a) Bentuk Tiga Dimensi dan (b) dari Satu Sisi.

Kelompok bahan dielektrik yang menunjukkan polarisasi spontan tanpa adanya medan listrik dikenal sebagai bahan ferroelectric. BaTiO_3 merupakan bahan ferroelektrik. Polarisasi spontan yang terjadi akibat posisi ion Ba^{2+} , Ti^{4+} , dan O^{2-} dalam sel unit. Ion Ba^{2+} berlokasi di pojok tiap sel unit, yang memiliki simetri tetragonal. Momen dipol yang dihasilkan dari perpindahan relatif ion O^{2-} dan Ti^{4+} dari posisi simetrisnya. Ion O^{2-} posisinya dekat posisi tengah namun sedikit ke bawah pada tiap sisi sel unit dimana ion Ti^{4+} berpindah ke atas dari posisi tengah sel unit. Saat BaTiO_3 dipanaskan diatas temperatur Curie ferroelectric (120°C) sel unitnya akan berubah menjadi kubik dan semua ion akan menempati posisi simetri dalam sel unit kubik; dikatakan bahan tersebut memiliki struktur kristal perovskite dan tidak memiliki karakteristik ferroelectric. Polarisasi spontan yang terjadi merupakan akibat dari interaksi dipol permanen yang saling berdekatan dimana saling bergantung pada arah yang sama.

Dimana pada BaTiO_3 perpindahan relatif dari ion O^{2-} dan Ti^{4+} pada arah yang sama untuk semua sel unit dalam volum tertentu. Karakteristik dielektrik suatu bahan dapat ditunjukkan dengan konstanta dielektrik. Pada tabel berikut dinyatakan beberapa nilai konstanta dielektrik dari keramik.

Tabel 6.1 Konstanta Dielektrik Bahan Keramik.

Bahan	Konstanta dielektrik	
	60 Hz	1 Mhz
Keramik titanat	-	15 – 10000
Mika	-	5,4 – 8,7
Steatite	-	5,5 – 7,5
Gelas kapur-soda	6,9	6,9
Porselen	6,0	6,0
Silika gelas	4,0	3,8
BaTiO_3	-	5000+

Konstanta dielektrik ini sangat bermanfaat digunakan sebagai kapasitor dikarenakan kemampuannya membendung medan listrik dan/atau bertindak sebagai isolator. Kemampuan dari kapasitor untuk menyimpan muatan pada tegangan tertentu dikenal dengan istilah kapasitansi. Kapasitansi C dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C = Q/V \quad (6.1)$$

dengan V adalah tegangan yang diberikan pada kapasitor dan Q adalah muatan listrik. Satuan dari kapasitansi adalah coulomb per volt atau farad ($C/V = F$). bila pelat paralel kapasitor dengan daerah vakum antara kedua pelat, nilai kapasitansi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$C = \epsilon_0 A/l \quad (6.2)$$

dengan A adalah luas penampang pelat dan l adalah jarak antara kedua pelat tersebut. Parameter ϵ_0 disebut permitivitas vakum yang bernilai $8,85 \times 10^{-12}$ F/m. Bila bahan dielektrik ditempatkan menggantikan ruang vakum diantara kedua pelat maka kapasitansi menjadi sebagai berikut:

$$C = \epsilon A/l \quad (6.3)$$

dengan ϵ adalah permitivitas dari bahan dielektrik yang tentunya akan lebih besar dari ϵ_0 . permitivitas relatif ϵ_r yang disebut juga sebagai konstanta dielektrik merupakan perbandingan dari

$$\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0 \quad (6.4)$$

konstanta dielektrik merupakan salah satu sifat bahan yang utama dalam mendesain kapasitor.

Contoh soal:

Tentukanlah kapasitansi silika gelas yang memiliki ketebalan 1 μm dan luas permukaan 2000 mm^2 dengan $\epsilon_r = 4$.

Pertama, yang perlu dilakukan adalah menghitung ϵ menggunakan persamaan 6.4, sehingga menjadi $\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$

$$\epsilon = 4 \times 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m} = 35,4 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Kemudian untuk kapasitansinya sendiri diselesaikan menggunakan persamaan 6.3, yaitu

$$C = \epsilon A/l = 35,4 \times 10^{-12} \times 2000 \times 10^{-6} / 1 \times 10^{-6} = 35,4 \times 10^{-12} \times 2000 = 70,8 \times 10^{-9} \text{ F}$$

Jadi kapasitasi silika gelas tersebut adalah $70,8 \times 10^{-9} \text{ F}$ atau 70,8 nF.

Karakteristik lainnya dari bahan keramik adalah *piezoelectric*. Bahan ini akan mengalami polarisasi dan medan listrik muncul pada bahan dengan diberikan gaya luar. Perubahan gaya luar akan merubah arah medan. Bahan *piezoelectric* digunakan sebagai transduser yang mengubah energi listrik menjadi regangan mekanik atau sebaliknya. Aplikasi lain dari bahan ini adalah microphone, speaker, audible alarm dan *ultrasonic imaging*.

5. Arus Bocor Pada Isolator Keramik

Lingkungan tropis ditandai dengan kelembaban tinggi, curah hujan tinggi, radiasi sinar matahari tinggi dan frekuensi petir cukup tinggi dibandingkan dengan iklim lain. Misalnya, wilayah dataran rendah memiliki kisaran temperatur 30–35° C dan kelembaban 50–80 % sedangkan wilayah dataran tinggi memiliki kisaran temperatur 20–25° C dan kelembaban 70–98%. Material lainnya seperti keramik memiliki kelebihan diantaranya adalah kekuatan mekanik yang lebih baik dan tidak mudah mengalami degradasi. Namun, material ini bersifat hidrofilik, memiliki massa jenis yang tinggi dan mudah pecah.

Kegagalan-kegagalan isolator dalam melaksanakan fungsinya dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu :

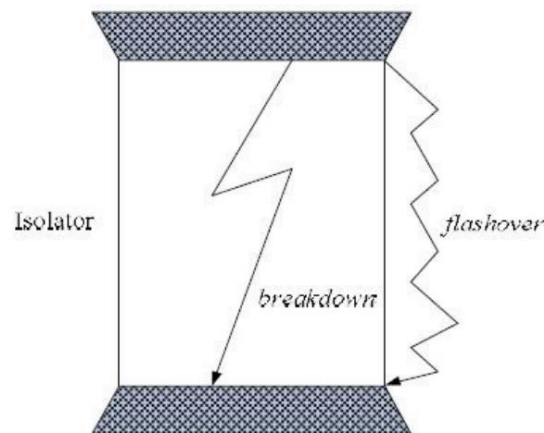
a. Kegagalan tembus (*breakdown*)

Kegagalan tembus (*breakdown*) biasanya disebabkan oleh faktor luar seperti sambaran petir. Persoalan ini dapat ditanggulangi oleh pengaman tanduk sehingga tidak mengenai isolator. Akibat kegagalan tembus (*breakdown*), karakteristik elektrik dari isolator tidak dapat pulih seperti semula dan sebagian isolator mengalami kerusakan mekanik sehingga tidak dapat digunakan kembali.

b. Kegagalan lewat denyar (*flashover*)

Kegagalan lewat denyar (*flashover*) umumnya bergantung pada tahanan permukaan dan bentuk isolator. Kegagalan ini biasanya disebabkan oleh kondisi lingkungan. Peristiwa lewat denyar menyebabkan terjadinya kerusakan pada permukaan isolator.

Kegagalan-kegagalan yang terjadi pada isolator keramik dapat diilustrasikan dalam Gambar 6.2 berikut.



Gambar 6.2. Ilustrasi Kebocoran Isolator Keramik

Tingkat polusi pada permukaan isolator dinyatakan dalam dua besaran, yaitu ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) dan NSDD (*Non Soluble Deposit Density*). ESDD menyatakan kandungan ekuivalen garam per satuan luas dari polutan yang terdeposit pada isolator. NSDD menyatakan jumlah polutan tak larut dalam air yang terdeposit pada isolator. Klasifikasi tingkat polusi menurut Standar IEC No. 815 tahun 1994 dikemukakan dalam Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Klasifikasi Polusi

ESDD (mg/cm ²)	Klasifikasi Polusi
0 - 0,03	Bersih atau polusi sangat ringan
0,03 - 0,06	Polusi ringan
0,06 - 0,1	Polusi Sedang
> 0,1	Polusi berat

Arus bocor dipermukaan isolator memiliki karakteristik menyerupai gelombang sinusoidal yang terdistorsi. Karakteristik bentuk dan besar gelombang ini akan berbeda sejalan dengan fenomena yang terjadi sebagai akibat mengalirnya arus bocor. Beberapa fenomena susulan yang sering muncul akibat mengalirnya arus bocor adalah pemanasan pada permukaan isolator, terbentuknya pita kering (*dry band*), munculnya busur listrik (*arc*), percikan api

(*spark*) dan terjadinya lewat denyar (*flashover*). Pemanasan secara terus-menerus di permukaan isolator dapat mempercepat penuaan (*aging*), terutama pada isolator polimer. Munculnya busur listrik (*arc*) dan terjadinya lewat denyar menyebabkan terbentuknya jejak erosi (*tracking*) pada permukaan isolator yang memiliki kontribusi terhadap proses penuaan dan menurunkan hidrofobisitas isolator.

Bahan baku yang digunakan untuk pembuatan isolator keramik porselen adalah kaolin dan ball clay sebagai bahan yang bersifat plastis dan felspar, pasir kuarsa, kapur, talk adalah bahan baku non plastis. Pada penelitian ini bahan baku yang diteliti sebagai bahan baku penyusun utama badan isolator adalah Kaolin. Kaolin merupakan massa batuan yang tersusun dari material lempung yang berwarna putih atau agak keputihan, demikian pula setelah dibakar akan berwarna putih atau hampir putih. Sifat fisik kaolin lainnya antara lain kekerasan antara 2 – 2,5 (Skala mohs), berat jenis 2,60 – 2,63 , daya hantar panas dan listrik rendah serta kadar asam (pH) yang bervariasi. Kaolin memiliki komposisi hidrous aluminium silikat ($2\text{H}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) yang diikuti oleh material ikutan lainnya. Komposisi mineral yang termasuk ke dalam kaolin antara lain kaolinit, nakrit dan halloysit (mineral utama, $\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{SiO}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) mempunyai kandungan air yang lebih besar. Untuk endapan yang ekonomis tidak ditemukan mineral seperti nakrit dan dikrit. Berdasarkan fungsinya kaolin memberikan sifat plastis sehingga bahan baku isolator dapat dan mudah dibentuk sebelum dibakar. Bersama *ball clay* apabila digunakan bersama-sama maka akan meningkatkan keplastisan massa (campuran) yang akan mempermudah dibentuk dan memperkuat kekuatan kering dari produk isolator.

C. Latihan Soal

1. Tentukan kapasitansi Al_2O_3 yang memiliki ketebalan $0.5\text{ }\mu\text{m}$ dan luas permukaan 2000 mm^2 dengan $\epsilon_r = 8$
2. Bila sebuah pelat paralel kapasitor memiliki luasan 3225 mm^2 dipisahkan pada jarak 1 mm , dan diantaranya ditempatkan bahan dengan konstanta dielektrik 3,5, tentukan
 - a. Nilai kapasitansi dari kapasitornya!

- b. Hitung tegangan listrik yang harus diberikan bila kapasitor menyimpan muatan sebesar 2×10^{-8} C.

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 7

BAHAN KOMPOSIT

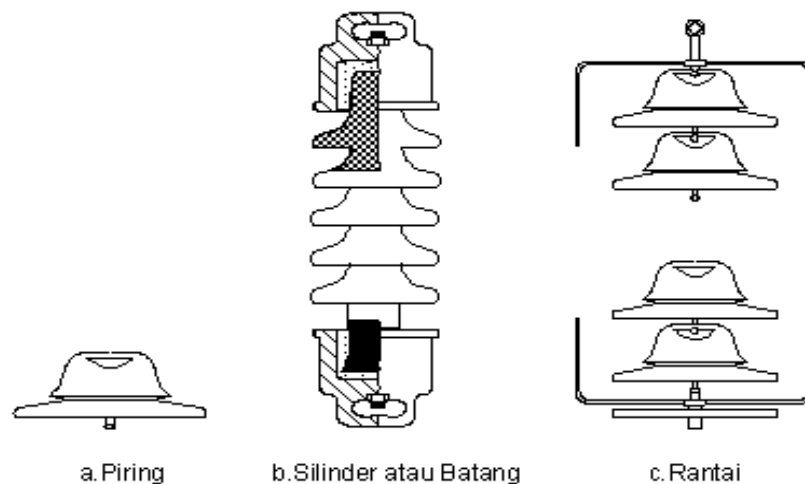
A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan struktur atom dan molekul, dan karakteristik bahan komposit.

B. Uraian Materi

1. Bahan Komposit

Isolator porselen dan gelas memiliki karakteristik elektrik yang baik, tetapi memiliki kelemahan diantaranya massanya berat, mudah pecah dan kemampuannya menahan tegangan berkrang karena polutan yang mudah menempel pada permukaannya. Untuk mengatasi kelemahan tersebut maka dikembangkanlah jenis isolator komposit. Bahan komposit tertua untuk isolator adalah kertas, akan tetapi akhir-akhir ini bahan komposit yang paling diminati dan terus dikembangkan untuk adalah karet silikon (*silicon rubber*). Struktur dari isolator komposit terdiri dari inti berbentuk tabung (*rod*) yang terbuat dari bahan komposit, sarung yang terbuat dari bahan komposit, *fitting* yang terbuat dari bahan logam dan bahan antar-muka (*interface*). Adapun bentuk dan struktur dari isolator komposit dapat dilihat pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Struktur Isolator Komposit

Kebutuhan terhadap bahan dengan karakteristik khusus seperti dalam bidang penerbangan, angkasa luar, kedalaman laut dan rekayasa biologi sangat tinggi. Seringkali dari bahan yang sudah dikenal tidak dapat memenuhi kebutuhan tersebut, dan sangat dimungkinkan dapat dipenuhi dari gabungan dua atau lebih bahan yang sudah ada. Komposit merupakan bahan dengan multi fasa yang diat secara rekayasa dengan fasa pembentuk yang berbeda secara kimia dan terpisah dengan antarmuka yang berbeda. Dalam komposit dikenal istilah matriks dan pengisi. Matriks merupakan fasa yang bersifat kontinu mengelilingi fasa lainnya (atau fasa pengisi). Karakteristik komposit merupakan fungsi dari karakteristik fasa pembentuk, jumlah relatif dan geometrinya. Geometri fasa pengisi yang mempengaruhi karakteristik komposit adalah konsentrasi, ukuran, bentuk, distribusi dan orientasi.

Dalam membentuk komposit, bahan pengisi dapat berupa partikel, partikel nano, serat atau bentuk struktur. Komposit dengan bahan pengisi partikel yang dimaksud ini adalah partikel yang besar dan terdispersi. Pada komposit ini berlaku kadiah campuran yang digunakan untuk memprediksi bahwa modulus elastis yang dimiliki komposit berada diantara batas atas.

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p \quad (7.1)$$

dan batas bawah

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{E_m V_m + E_p V_p} \quad (7.2)$$

Dimana E adalah modulus elastis dan V adalah fraksi volum. Sedangkan c, m dan p menunjukkan komposit, matriks dan partikel.

Untuk komposit yang diperkuat oleh partikel terdispersi, partikel ini dapat berupa logam atau non logam dan umumnya digunakan bahan oksida. Mekanisme penguatan yang terjadi adalah interaksi antara partikel dan dislokasi dalam bahan dimana terjadi pengerasan presipitasi.

Komposit yang diperkuat dengan serat memiliki tujuan untuk meningkatkan kekuatan dan/atau kekakuannya. Karakteristik ini ditunjukan dari parameter kekuatan spesifik dan modulus spesifik yang berhubungan dengan rasio kekuatan tarik dengan gravitasi dan modulus eleastik dengan gravitasi. Panjang

serat kritis diperlukan untuk memperoleh penguatan dan kekakuan yang efektif pada pembentukan bahan komposit. Panjang serat kritis dituliskan sebagai.

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (7.3)$$

dimana untuk l_c adalah panjang kritis serat, d adalah diameter serat dan σ_f adalah kekuatan tarik serat dan τ_c adalah kekuatan ikatan serat dengan matriks.

Orientasi dan konsentrasi serat mempengaruhi karakteristik komposit. Orientasi yang ekstrim yaitu serat tersusun secara acak atau tersusun secara menyilang tegak lurus satu dengan yang lainnya. Untuk serat kontinu, umumnya lebih terarah dibandingkan dengan serat yang diskontinu yang susunannya didapatkan secara acak .

Komposit merupakan suatu jenis bahan baru hasil rekayasa yang terdiri dari dua atau lebih bahan dimana sifat masing-masing bahan berbeda satu sama lainnya baik itu sifat kimia maupun fisiknya dan tetap terpisah dalam hasil akhir bahan tersebut (bahan komposit). Pada umumnya bahan material komposit terdiri dari dua bahan, yaitu:

a. Serat (Fiber)

- 1) Sebagai unsur utama pada komposit.
- 2) Menentukan karakteristik bahan komposit, seperti kekuatan dan sifat mekanik lainnya.
- 3) Menahan sebagian besar gaya yang bekerja pada material komposit.
- 4) Bahan yang dipilih harus kuat dan getas, carbon, glass, boron dan lain-lain.

b. Matrik (Resin)

- 1) Melindungi dan mengikat serat agar dapat bekerja dengan baik.
- 2) Bahan yang dipilih bahan yang lunak.
- 3) Dari pengertian di atas dan unsur-unsur utamanya, maka dapat diamati bahwa sebagian besar struktur alami yang terdapat di alam adalah dalam bentuk komposit, contohnya:
 - a) Daun padi, terdiri dari serat daun yang dibungkus oleh matrik yaitu lychnin.
 - b) Batang bambu, terdiri dari bahan serat yang diikat oleh matrik dengan kuat sehingga kaku dan ringan

Kelebihan dari penggunaan isolator komposit:

- a. Ringan, karena rapat massanya lebih rendah daripada isolator porselen atau gelas.
- b. Pembuatannya lebih mudah.
- c. Tidak ada rongga udara, sehingga tidak terjadi peluahan sebagian di dalam bahan isolator komposit.
- d. Bentuk isolator lebih sederhana.
- e. Permukaan sarung memiliki sifat menolak air (hydrophobic), sehingga polutan yang terbawa oleh air tidak menempel pada permukaan sarung.
- f. Cocok pada daerah yang bobot polusinya berat karena polutan tidak menempel pada isolator.

Kekurangan dari penggunaan isolator komposit:

- a. Harga material dasar untuk pembuatan komposit mahal.
- b. Kekuatan mekanisnya lebih rendah.
- c. Penuaan lebih cepat

2. Jenis-jenis komposit

a. Komposit Matriks Polimer

Komposit matriks polimer merupakan bahan komposit yang sering digunakan, sering disebut polimer berpenguatan serat (*fibre reinforced polymers or plastics*) bahan ini menggunakan suatu polimer berdasarkan resin sebagai matriknya dan suatu jenis serat seperti kaca, karbon dan aramid (*kevlar*) sebagai penguatannya. Komposit matriks polimer mengandung matriks resin polimer dengan serat sebagai penguatnya. Bahan Komposit matriks polimer sangat luas penggunaannya karena memiliki sifat yang ringan pada temperatur ruang, mudah dibuat, dan murah. Kenaf adalah salah satu tanaman yang dapat dibuat serat dan kemudian digunakan sebagai penguat pada material komposit matriks polimer. Kenaf merupakan temuan penting sebagai serat penguat untuk material komposit dan aplikasi industri lainnya karena dikenal sebagai sumber selulosa yang baik secara ekonomi maupun ekologi. Serat kenaf memiliki kandungan lignin 8-13% dan cellulose 45-57%. Serat kenaf mempunyai kekuatan tarik 930 MPa dan modulus Young 53 GPa. Klasifikasi komposit matrik polimer berdasarkan penguatnya, antara lain,

- 1) Komposit polimer diperkuat serat gelas.
- 2) Komposit polimer diperkuat serat karbon.

- 3) Komposit polimer diperkuat serat aramid.
- 4) Penguat lainnya.
- 5) Secara umum komposit matrik polimer diperkuat oleh serat gelas karbon dan aramid. Namun tidak menutup kemungkinan untuk diperkuat oleh serat boron, silikon karbida dan aluminium oksida.

b. Komposit Matriks Logam

Komposit matriks logam ditemukan telah berkembang pada industri otomotif, dimana bahan ini menggunakan suatu bahan logam seperti aluminium yaitu sebagai matrik dan penguatnya dengan serat seperti silikon karbida. Logam yang digunakan sebagai matriks memiliki sifat yang lentur. Komposit ini digunakan pada temperatur yang lebih tinggi dari logam matriksnya. Penguatan matriks bertujuan untuk meningkatkan kekakuan, kekuatan spesifik, ketahanan abrasi, ketahanan mulur, konduktivitas panas dan stabilitas dimensi. Bahan yang digunakan sebagai matriks umumnya adalah aluminium, magnesium, titanium dan tembaga. Bentuk dari penguatnya umumnya berupa partikulat, serat kontinu dan diskontinu serta serpihan dengan jumlah berkisar 10 – 60 persen volum. Komposit matrik logam dapat diklasifikasi dengan beberapa cara. Salah satu klasifikasi adalah berdasarkan jenis dan kontribusi komponen penguat (reinforce) yang dapat berupa partikel, layer, fiber dan penetrasi material komposit.

Penguat untuk komposit matriks logam mempunyai banyak jenis dan bentuk, yang mana hal tersebut ditentukan oleh proses produksi dan pemrosesan serta sistem matriks tersebut. Berikut adalah beberapa syarat umum yang sering digunakan sebagai penguat:

- 1) Kepadatan rendah
- 2) Kompatibilitas mekanik (koefisien ekspansi termal yang rendah tetapi disesuaikan dengan matriks)
- 3) Kompatibilitas kimia
- 4) Stabilitas termal
- 5) Nilai modulus *young* yang tinggi
- 6) Kompresi tinggi dan kekuatan tarik
- 7) Dapat diproses dengan baik
- 8) Efisiensi ekonomi

Tuntutan ini dapat dicapai hanya dengan menggunakan penguat non-logam anorganik. Karena kepadatan tinggi dan afinitas untuk reaksi dengan matriks

paduan, penggunaan serat logam biasanya gagal. Komponen yang akhirnya digunakan, tergantung pada matriks yang dipilih dan pada profil permintaan aplikasi yang dimaksud. Material komposit matriks logam dapat diproduksi dengan berbagai teknik. Fokus dari pemilihan rekayasa proses yang sesuai adalah jenis yang diinginkan, kuantitas dan distribusi komponen penguatan (partikel dan serat), paduan matriks dan aplikasi. Dengan mengubah metode manufaktur, pengolahan dan finishing, serta dengan bentuk komponen penguatan adalah mungkin untuk mendapatkan profil karakteristik yang berbeda, meskipun komposisi yang sama dan jumlah komponen yang terlibat. Produksi bahan prekursor yang cocok, pengolahan ke unit konstruksi atau bahan setengah jadi (profil) dan perlakuan finishing yang harus dipisahkan.

c. Komposit Matrik Keramik

Komposit matriks keramik merupakan material 2 fasa dengan 1 fasa berfungsi sebagai reinforcement dan 1 fasa sebagai matriks, dimana matriksnya terbuat dari keramik. Reinforcement yang umum digunakan pada bahan ini adalah oksida, carbide, nitride. Salah satu proses pembuatan dari CMC yaitu dengan proses dimox yaitu proses pembentukan komposit dengan reaksi oksidasi leburan logam untuk pertumbuhan matriks keramik disekeliling daerah filler. Bahan ini digunakan pada lingkungan bertemperatur sangat tinggi, bahan ini menggunakan keramik sebagai matrik dan diperkuat dengan serat pendek atau serabut-serabut (*whiskers*) dimana terbuat dari silikon karbida atau boron nitrida. Bahan keramik memiliki ketahanan terhadap oksidasi dan kerusakan pada temperatur tinggi, terlepas memiliki sifat yang rapuh. Bahan keramik sangat ideal untuk digunakan pada temperatur tinggi dan menerima tegangan yang sangat berat seperti komponen dalam kendaraan bermotor atau mesin pesawat jet. Ketangguhan fraktur keramik dapat ditingkatkan dengan komposit matriks keramik dengan diperkuat baik partikulatm serat atau serpihan. Komposit matriks keramik dapat dibuat melalui teknik *hot pressing*, *hot iso-static pressing* dan *liquid-pahse sintering*. Inovasi komposit keramik menguat disebabkan oleh munculnya tantangan-tantangan dalam penggunaan material keramik, seperti diketahui bahwa komposit matriks keramik mempunyai keunggulan tahan aus, tahan suhu tinggi serta berat jenis yang lebih rendah dibandingkan dengan material lain seperti logam dan polimer, sedangkan kelemahannya adalah antara lain rendahnya tahan kejut termal dan rapuh Komposit matrik keramik ini dapat diaplikasikan pada

berbagai komponen mesin salah satunya seperti gas turbin. Tipe-tipe dari bahan ini biasanya dikelompokkan berdasarkan penguatnya menjadi sebagai berikut:

1) Partikulasi

Partikulasi yaitu komposit matriks keramik yang mempunyai sudut hampir sama. Partikulasi komposit matriks keramik digunakan secara luas dalam aplikasi industri. Komposit matriks keramik jenis infokus pada matrik Al dengan bahan penguat yang paling umum adalah SiC atau Al₂O₃. Penguat lain seperti TiB₂B₄C, SiO₂, TiC, Wc, BN, ZrO₂, W dan lain- lain juga telah diteliti.

2) Serat pendek (Dengan Atau Tanpa Pensejajaran)

Pada pertengahan 1980-an, komposit matriks keramik serat pendek mendapat perhatian luas dengan dikembangkannya piston-piston mesin diesel yang diperkuat dengan serat-serat alumina pendek (Contohnya ICI saffil). Serat lain yang mirip (*alumino-silicate*) juga sudah digunakan untuk aplikasi ini. Serat-serat ini memiliki kristal majemuk berstruktur mikro dengan butiran halus, panjang serat berukuran beberapa mikro. Komponen-komponen tersebut biasanya diperoleh dengan infiltrasi leburan.

3) Serat Panjang Sejajar

Beberapa sistem komposit matriks keramik serat panjang telah diteliti dan beberapa diantaranya telah digunakan dalam aplikasi tertentu. Namun demikian pemanfaatannya terbatas sebagai konsekuensi dari kesulitan pemrosesan serta keterbatasan kekenyalan dan kekerasan. Komposit matriks keramik serat panjang tersedia dalam bentuk multifilamen, yaitu mengacu pada serat yang berdiameter relatif kecil (~ 5-30 μ m). Serat ini cukup fleksibel untuk ditangani dalam bentuk *tows* (serat yang tidak bergulung atau membentuk ikatan simpul), bisa dengan ditenun, dianyam atau berbentuk lembaran. Komposit matriks keramik multifilamen diproduksi dengan cara infiltrasi leburan. Kendat SiC telah berhasil digunakan dalam partikulasi komposit matriks keramik tetapi multifilament. Serat SiC yang cocok sebagai bahan pengikat logam tidak tersedia dipasaran. Produk yang tersedia dipasaran dengan merek Nicalon cenderung mengandung silika dan karbon bebas dengan kadar tinggi yang menyebabkan reaksi berlebihan terhadap kebanyakan bahan

pengikat selama pemrosesan komposit matriks keramik. monofilamen adalah serat berdiameter besar ($\sim 100\text{-}150\text{ }\mu\text{m}$), biasanya diperoleh dengan cara Chemical Vapor Deposition (CVD) dengan inti SiC atau Boron (B) ke inti serat karbon atau kawat tungsten. Monofilamen kurang lentur dibanding multifilamen sehingga ditangani sebagai serat tunggal dan perlu adanya peringatan akan bahaya permukaan yang tajam.

Komposit matriks keramik merupakan kombinasi dari metal (sebagai matrik) dengan dua atau lebih material non metal (sebagai *reinforcement*) yang digabungkan dalam skala makroskopis untuk membentuk material baru yang berguna. Metal matrik komposit ini mempunyai sifat-sifat yang terbaik dari unsur-unsur penyusunnya, bahkan seringkali memiliki beberapa sifat lain yang tidak ada dalam unsur penyusunnya itu. Sifat yang dapat dihasilkan dengan membentuk suatu metal matrik komposit adalah kekuatan, kekerasan, ketahanan korosi, ketahanan aus, umur fatik, sifat konduktifitas listrik dan lain-lain.

d. Komposit Karbon-karbon

karbon merupakan salah satu bentuk material komposit. Material komposit, yang diambil dari istilah bahasa inggris *composition materials* atau dipendekkan menjadi *composite materials* adalah suatu material yang dibuat dari dua atau lebih material penyusun yang saling memiliki perbedaan sifat fisik dan kimia, yang apabila dikombinasikan akan menghasilkan material yang berkarakteristik berbeda dengan material-material penyusunnya. Komposit serat karbon merupakan salah satu jenis material komposit yang menggunakan fiber karbon sebagai salah satu penyusunnya. Komposit karbon-karbon relatif baru dan mahal sehingga belum banyak diaplikasikan. Bahan ini memiliki modulus tarik dan kekuatan tarik yang tinggi dan mampu bertahan hingga temperatur lebih dari $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Selain itu, komposit ini juga memiliki ketahanan mulur dengan nilai ketangguhan fraktur yang tinggi. Karakteristik termal komposit ini memiliki konduktivitas panas yang tinggi dengan koefisien muai panas yang rendah. *Fiber carbon* merupakan salah satu pengisi material komposit yang paling sering digunakan di dunia industri. Serat ini memiliki penyusun material yang lebih dari satu serta mempunyai sifat kimia dan fisik yang berbeda. Serat karbon memiliki karakteristik yang jauh lebih ringan dibanding logam, tetapi memiliki karakteristik yang kuat. Selain itu, *fiber carbon* merupakan bahan yang mudah ditemui di pasaran.

Komposit serat karbon dibuat dengan bundel pultruding dari karbon kontinu serat dengan resin. Serat karbon kontinu diumpankan pada creels dan kemudian bergerak melalui bak impregnasi resin cair dalam tangki resin. Serat karbon karenanya dilapisi dengan polimer yang bisa saling berhubungan dalam fase cair. Serat karbon yang dibasahi kemudian melewati cetakan membentuk / menyembuhkan di mana panas dan tekanan diterapkan untuk membentuk dan menyembuhkan komponen menjadi komposit padat. Menarik, terletak di wilayah hilir dadu, memberikan kekuatan untuk memindahkan komposit melalui berbagai tahapan proses. Persimpangan bentuk penampang komposit ditentukan oleh bentuk cetakan. Sifat dari karbon fiber dipengaruhi oleh beberapa faktor. Satu faktor yang paling utama adalah arah atau alur serat karbon. Berbeda dengan material logam, karbon fiber khususnya dan material komposit lain pada umumnya, disebut sebagai material anisotropik. Maksudnya adalah sifat properti material ini dipengaruhi oleh bentuk dan arah serat penyusunnya. Sehingga kekuatan karbon fiber sangat bergantung terhadap bentuk dan arah serat karbon penyusunnya. Berikut adalah beberapa faktor utama yang mempengaruhi sifat-sifat karakteristik

karbon fiber:

- 1) Tipe serat karbon dan resin yang digunakan.
- 2) Rasio campuran serat karbon dan resin.
- 3) Bentuk serat karbon: searah, bersilangan, berkaitan, atau tidak tentu.
- 4) Kualitas serat: distribusi serat yang merata, ada tidaknya celah.

e. Komposit Hybrid

Komposit hybrid merupakan komposit yang diperkuat serat dengan menggabungkan dua atau lebih jenis serat penguatnya dalam satu jenis matriks. Komposit ini memiliki kombinasi sifat yang lebih baik dibandingkan dengan komposit yang hanya mengandung satu jenis serat. Dalam pembuatannya ada berbagai cara untuk menggabungkan dua serat yang berbeda sehingga akan diperoleh sifat bahan yang terbaik. Komposit hybrid ini utamanya digunakan sebagai komponen struktur untuk kendaraan darat, air dan udara yang ringan, peralatan olahraga dan juga komponen ortopedik yang ringan. Matrik yang umum digunakan pada komposit hybrid adalah polimer berbahan resin dan penguat serat sintetis. Namun penggunaan kedua jenis material tersebut akan mengakibatkan masalah bagi lingkungan karena

sulitnya terdegradasi oleh alam. Salah satu pertimbangan dalam merencanakan bahan komposit hybrid adalah bagaimana agar material komposit yang akan digunakan dalam suatu konstruksi dapat terdegradasi secara alami di alam. Penggunaan serat alami adalah solusi agar tujuan tersebut dapat tercapai. Salah satu contoh serat alami yang digunakan sebagai serat penguat pada material komposit hybrid adalah serat ijuk aren. Serat ijuk sebagai elemen penguat sangat menentukan sifat mekanik dari komposit karena meneruskan beban yang didistribusikan oleh matriks. Orientasi arah serat, fraksi volume, ukuran dan bentuk serta material adalah faktor-faktor yang mempengaruhi properti mekanik dan laminat komposit. Dilihat dari bentuknya, serat ijuk tidak homogen, hal ini disebabkan oleh pertumbuhan dan pembentukan serat tersebut bergantung pada lingkungan alam dan musim. Aren termasuk salah satu jenis tanaman palma yang tersebar hampir diseluruh wilayah Indonesia. komposit hybrid serat ijuk/serat gelas sudah cukup banyak digunakan dalam penelitian sebagai bahan material komposit. Namun pembuatan material komposit hybrid menggunakan perbandingan variasi lapisan serat gelas masih jarang dilakukan. Munculnya permasalahan limbah nonorganik serat sintesis yang semakin bertambah mampu mendorong perubahan teknologi komposit yang ramah lingkungan. Serat alam mencoba menggeser serat sintesis, seperti *e-glass*, *kevlar-49*, *carbon/ graphite*, *silicone*. Satu jenis serat alam yang tersedia secara melimpah adalah serat rami.

f. Komposit Laminar

Komposit laminar merupakan komposit struktur yang terdiri atas beberapa lembaran atau panel yang saling berikatan satu dengan lainnya. Setiap lembar memiliki kekuatan yang tinggi pada arah tertentu. Struktur yang terdiri atas beberapa lapisan ini disebut dengan laminar. Sifat dari laminar ini bergantung pada beberapa faktor, termasuk bagaimana variasi arah dari kekuatan yang tinggi dari satu lapisan ke lapisan lainnya. Berdasarkan hal ini, komposit laminar dapat dibagi menjadi empat kelas yaitu *unidirectional*, *cross-ply*, *angle-ply* dan *multidirectional*. Aplikasi komposit ini digunakan dalam pesawat terbang, otomotif dan infrastruktur bangunan. Sebagai elemen sebuah struktur, laminar yang serat penguatnya searah saja (*unidirectional laminate*) pada umumnya tidak menguntungkan karena memiliki sifat yang buruk. Untuk itulah struktur komposit dibuat dalam bentuk laminar yang

terdiri dari beberapa macam laminar atau lapisan yang diorientasikan dalam arah yang diinginkan dan digabungkan bersama sebagai sebuah unit struktur. Terdapat beberapa jenis laminar, yaitu

1) *Continuous Fiber Laminate*

Laminar jenis ini mempunyai laminar penyusun dengan serat yang tidak terputus hingga mencapai ujung-ujung lamina. *Continuous fiber laminate* terdiri dari:

a) *Unidirectional laminate* (satu arah)

Adalah bentuk laminate dengan tiaplamina mempunyai arah serat yang sama. Kekuatan terbesar dari kompositlamina ini adalah searah seratnya.

b) *Crossplien quasi-isotropoic* (silang)

Laminar ini mempunyai susunan seratyang saling silang tegak lurus satu sama lain antara lamina.

c) *Random/Woven Fiber Composite*

Laminar ini mempunyai susunan serat.

2) *Discontinuous Fiber Composite*

Berbeda dengan jenis sebelumnya maka laminar ini pada masing-masing laminar terdiri dari potongan serat pendek yangterputus dan mempunyai dua jenis yaitu:

a) *Short Alighned Fiber*

Potongan serat tersusun dalam arah tertentu, sesuai dengan keperluan setiap laminar.

b) *In-Plane Random Fiber*

Potongan serat disebarkan secara acak atau arahnya tidak teratur.

g. Komposit *Sandwich*

Komposit ini juga merupakan komposit struktur untuk memperoleh panel yang ringan dan memiliki kekuatan dan kekakuan yang tinggi. Setiap panel sandwich terdiri atas dua sisi lapisan luar yang dipisahkan oleh bahan inti yang lebih tebal. Bahan sisi luar ini umumnya paduan aluminium, baja dan baja tahan karat yang kuat dan kaku untuk menopang beban tekuk. Bahan inti sangat ringan dan umunya memiliki modulus elastis yang rendah. Kategori bahan inti ini terbagi menjadi tiga, yaitu: busa padat polimer, kayu dan

berbentuk sarang lebah. Polimer thermosetting dan thermoset dapat digunakan. Kayu balsa umum digunakan sebagai bahan inti karena densitasnya yang rendah, relatif murah dan memiliki kekuatan kompresi dan geser yang tinggi. Bahan ini dengan struktur sarang lebah memiliki karakteristik mekanik yang anisotropis. Kelebihan dari struktur ini, memiliki karakteristik untuk meredam getaran. Bahan yang digunakan untuk struktur sarang lebah ini antara lain, aluminium, titanium, paduan nikel, baja tahan karat, polimer kertas karton dan serat aramid. Panel sandwich banyak digunakan pada pesawat terbang, bangunan, kendaraan bermotor dan aplikasi di laut. Komposit *sandwich* merupakan salah satu jenis komposit struktur yang sangat potensial untuk dikembangkan. Komposit sandwich merupakan komposit yang tersusun dari 3 lapisan yang terdiri dari flat composite (*metal sheet*) sebagai kulit permukaan (*skin*) serta material inti (*core*) di bagian tengahnya (berada diantaranya). Komposit *sandwich* dibuat dengan tujuan untuk efisiensi berat yang optimal, namun mempunyai kekakuan dan kekuatan yang tinggi. Sehingga untuk mendapatkan karakteristik tersebut, pada bagian tengah diantara kedua *skin* dipasang *core*. Komposit *sandwich* merupakan jenis komposit yang sangat cocok untuk menahan beban lentur, impak, meredam getaran dan suara. Komposit *sandwich* dibuat untuk mendapatkan struktur yang ringan tetapi mempunyai kekakuan dan kekuatan yang tinggi. Biasanya pemilihan bahan untuk komposit *sandwich*, syaratnya adalah ringan, tahan panas dan korosi, serta harga yang juga menjadi pertimbangan. Dengan menggunakan material inti yang sangat ringan, maka akan dihasilkan komposit yang mempunyai sifat kuat, ringan, dan kaku sesuai kebutuhan.

h. Komposit nano

Komposit nano merupakan gabungan partikel yang berukuran nano dengan bahan matriks. Komposit nano dibuat dengan tujuan untuk memperoleh sifat mekanik, listrik, magnetik, optik, thermal, biologi dan transport yang tinggi bila dibandingkan dengan bahan penguat biasa. Fenomena yang unik dari ukuran yang lebih kecil adalah perubahan karakteristik fisis dan kimia yang drastis. Komposit nano merupakan material padat multi fase, dimana setiap fase memiliki satu, dua atau tiga dimensi yang kurang dari 100 nanometer (nm), atau struktur padat dengan dimensi berskala nanometer yang berulang pada jarak antar bentuk penyusun struktur yang berbeda. Material-material dengan

jenis seperti itu terdiri atas padatan anorganik yang tersusun atas komponen organik. Contoh Komposit nano yang ekstrem adalah media berporos, koloid, gel dan kopolimer. Komposit nano dapat ditemukan di alam, contohnya adalah kulit tiram dan tulang. Komposit nano memiliki struktur padat dengan dimensi berskala nanometer yang berulang pada jarak antar bentuk penyusun struktur yang berbeda. Bahan komposit nano biasanya terdiri dari padatan anorganik yang mengandung komponen zat organik atau sebaliknya. Komposit nano dapat juga menjadi media berpori, koloid, gel dan kopolimer. Secara umum, material Komposit nano mendemonstrasikan sifat mekanik, elektrik, optik, elektrokimia, katalik dan struktural yang berbeda dari masing-masing komponen. Jenis-jenis Komposit nano diantaranya:

1) Nanokomposit Keramik Matriks

Ceramic matrix composites (CMCs) terdiri dari serat keramik yang tertanam dalam matriks keramik. Matriks dan serat dapat terdiri dari bahan keramik, termasuk karbon dan serat karbon. Keramik menempati sebagian besar volume sering dari kelompok oksida, seperti nitrida, borida, silikida, sedangkan komponen kedua sering merupakan logam. Idealnya kedua komponen terdispersi halus satu sama lain untuk memperoleh sifat optik, listrik dan magnetik tertentu serta tribologi, ketahanan korosi dan sifat pelindung lainnya. Diagram fase biner dari campuran harus dipertimbangkan dalam merancang nanokomposit keramik-logam dan langkah-langkah harus diambil untuk menghindari reaksi kimia antara kedua komponen. Poin terakhir terutama penting untuk komponen logam yang dapat dengan mudah bereaksi dengan keramik dan dengan demikian kehilangan karakter logamnya. Ini bukan kendala yang mudah dipatuhi karena persiapan komponen keramik umumnya membutuhkan suhu proses yang tinggi. Maka, langkah teraman adalah memilih fase logam dan keramik yang tidak bercampur.

2) Nanokomposit Logam Matriks

Nanokomposit matriks logam juga dapat didefinisikan sebagai komposit matriks logam yang diperkuat. Jenis komposit ini dapat diklasifikasikan sebagai bahan bertulang kontinu dan non kontinu. Salah satu nanokomposit yang lebih penting adalah komposit matriks karbon nanotube logam, yang merupakan bahan baru yang sedang dikembangkan untuk mengambil keuntungan dari kekuatan tarik tinggi

dan konduktivitas listrik dari bahan karbon nanotube. Yang sangat penting bagi realisasi CNT-MMC yang memiliki sifat optimal di area ini adalah pengembangan teknik sintesis yang dapat diproduksi secara ekonomi, menyediakan dispersi nanotube homogen dalam matriks logam dan mengarah pada kuat adhesi antarmuka antara matriks logam dan karbon nanotube.

3) Nanokomposit Polimer Matrik

Dalam kasus paling sederhana, menambahkan nanopartikel ke matriks polimer secara tepat dapat meningkatkan kinerjanya, seringkali secara dramatis, hanya dengan memanfaatkan sifat dan sifat dari pengisi skala nano (bahan-bahan ini lebih baik dijelaskan dengan istilah komposit polimer nanofilled). Strategi ini sangat efektif dalam menghasilkan komposit kinerja tinggi, ketika dispersi seragam pengisi tercapai dan sifat-sifat pengisi skala nano secara substansial berbeda atau lebih baik daripada matriks. Keseragaman dispersi dalam semua nanokomposit ditetrapkan oleh komponen pemisahan fasa yang digerakkan secara termodinamik. Pengelompokan pengisi skala nano menghasilkan agregat yang berfungsi sebagai cacat struktural dan mengakibatkan kegagalan. Rakitan lapis demi lapis (LbL) ketika lapisan skala nanometer dari nanopartikel dan polimer ditambahkan satu per satu.

4) Nanokomposit Magnetik

Nanocomposites yang dapat menanggapi stimulus eksternal adalah bunga yang meningkat karena fakta bahwa, karena sejumlah besar interaksi antara antarmuka fasa, respon stimulus dapat memiliki efek yang lebih besar pada komposit secara keseluruhan. Stimulus eksternal dapat mengambil banyak bentuk, seperti medan magnet, listrik atau mekanik. Secara khusus, nanocomposites magnetik berguna untuk digunakan dalam aplikasi ini karena sifat kemampuan bahan magnetik untuk merespon rangsangan listrik dan magnetik.

C. Latihan Soal

	Gravitasi spesifik	Modulus Young (GPa)
Tembaga	8,9	110
Tungsten	19,3	407

Dari data di atas tentukan batas atas kekakuan spesifik dari komposit:

1. 0,7 fraksi volum tungsten dan 0.3 fraksi volum tembaga
2. 0,8 fraksi volum tungsten dan 0.2 fraksi volum tembaga

	Modulus Young [GPa (psi)]	Kekuatan tarik [MPa (psi)]
Serat aramid	131 (19×10^6)	3600 (520000)
Polycarbonate	2,4 ($3,5 \times 10^5$)	65 (9425)

Dari data di atas tentukan kekuatan tarik dan modulus Young pada arah longitudinal dari komposit

3. 45 persen volum serat aramid dan 55 persen volum polycarbonate
4. 35 persen volum serat aramid dan 65 persen volum polycarbonate

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 8

BAHAN LOGAM

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan struktur atom dan molekul dan karakteristik kelistrikan bahan logam.

B. Uraian Materi

1. Struktur kristal dan densitas teoritis.

Dalam bahan logam tentunya ikatan atom yang dominan. Susunan atom dalam struktur kristal terbatas akan atom terdekatnya. Beberapa struktur kristal yang dimiliki logam adalah

a. *Face-centered cubic* (FCC)

Struktur kristal ini memiliki atom di tiap sudut parameter kisinya dan ditengah tiap sisi kubus. Logam yang memiliki sudut kristal ini antara lain: tembaga, aluminium, perak dan emas. Untuk menggambarkan panjang kisi kubus dari atom yang ada dalam struktur kristal kubus FCC dituliskan dengan

$$a = 2R\sqrt{2} \quad (8.1)$$

dengan a adalah Panjang kisi dan R adalah jari-jari atom.

Dalam satu unit sel terdapat 4 buah atom. Karakteristik lainnya yang penting tentang struktur kristal adalah bilangan koordinasi dan faktor kemasan atomic (APF). Untuk logam setiap atom memiliki jumlah atom tetangga yang sama dan nilai ini adalah bilangan koordinasi. Untuk FCC bilangan koordinasi adalah 12. Sedangkan nilai APF merupakan jumlah volum seluruh atom dalam unit sel (dengan asumsi bentuknya adalah bola) dibagi dengan volum unit sel tersebut.

$$APF = \frac{\text{volum atom dalam unit sel}}{\text{total volume unit sel}} \quad (8.2)$$

Untuk struktur FCC nilai APF ini adalah 0,74, yang menunjukkan kemungkinan tertinggi diisi oleh atom berbentuk bola dengan diameter yang sama. Pada logam umumnya memiliki nilai APF yang tinggi akibat dari awan elektron bebas.

b. *Body-centered cubic* (BCC)

Selain FCC, struktur BCC merupakan struktur yang umum pada logam. Atom berada pada tiap sudut kisi dan satu atom berada ditengah-tengah kubus. Untuk nilai parameter kisi struktur kristal dari jari-jari atom ditulis dalam

$$a = 4R/\sqrt{3} \quad (8.3)$$

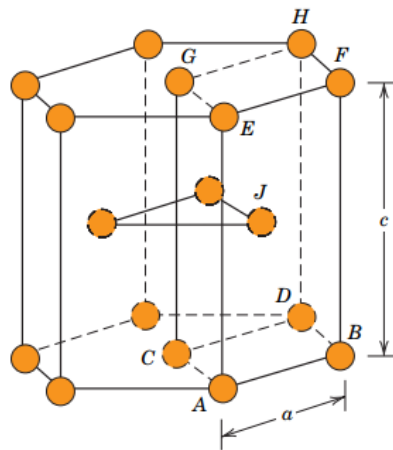
logam dengan struktur kristal ini antara lain chromium, iron, dan tungsten.

Dalam satu unit sel terdapat 2 buah atom. Bilangan koordinasi untuk struktur kristal BCC adalah 8. Bilangan koordinasi BCC lebih rendah dari FCC, demikian juga dengan nilai APF BCC yang lebih rendah dari APF FCC yaitu sebesar 0,68.

Saat ini ada satu unsur yaitu polonium yang dikategorikan metaloid (semi-logam) memiliki struktur kristal *simple cubic* (SC). Struktur SC ini terdiri atas 1 buah atom dalam unit sel, dimana atomnya berada disetiap sudut dalam unit sel. Bilangan koordinasi struktur SC ini sebesar 6. Pada umumnya logam tidak ada yang memiliki struktur kristal SC, karena nilai APF-nya yang sangat rendah yaitu sebesar 0,52.

c. *Hexagonal close-packed* (HCP)

Dalam struktur ini terdapat 6 atom dalam setiap unit sel. Ilustrasi dari struktur HCP disajikan pada Gambar 8.1.



Gambar 8.1. Unit Sel HCP dengan Parameter Kisi a dan c.

Rasio dari c/a sebesar 1,633, namun pada logam HCP rasio ini akan bergeser dari nilai idealnya. Bilangan koordinasi dan APF dari struktur HCP sama dengan struktur FCC yaitu 12 dan 0,74. Beberapa logam yang memiliki struktur HCP adalah cadmium, magnesium, titanium dan zinc.

Dari Gambar 8.1 nilai dari parameter kisi a dituliskan sebagai,

$$a = 2R \quad (8.4)$$

dan untuk volum unit selnya adalah

$$V_c = 3a^2c\sqrt{3}/2 \quad (8.5)$$

$$V_c = 6R^2c\sqrt{3} \quad (8.6)$$

Untuk menghitung densitas teoritis dari logam digunakan persamaan

$$\rho = \frac{nA}{V_c N_A} \quad (8.7)$$

dengan n adalah jumlah atom dalam unit sel, A adalah berat atom, V_c adalah volum unit sel dan N_A adalah bilangan Avogadro ($6,022 \times 10^{23}$ atom/mol).

2. Karakteristik listrik

Logam memiliki kemampuan untuk menghantarkan arus listrik dengan baik. Kemampuan ini ditentukan dengan kemudahan elektron bergerak dalam medan listrik. Pada logam elektron terluar dari logam sangat mudah untuk bergerak sehingga dapat menghantarkan arus listrik. Jenis bahan logam terbagi dalam tiga jenis yaitu logam konduktif, logam resistif dan logam paduan, penjelasan yang lebih detail mengenai ketiga jenis bahan logam tersebut adalah

a. Logam Konduktif

Konduktivitas listrik dalam logam adalah hasil dari pergerakan partikel bermuatan listrik. Atom dari unsur logam dicirikan oleh adanya elektron valensi, yaitu elektron di kulit terluar sebuah atom yang bebas bergerak. Elektron bebas inilah yang memungkinkan logam menghantarkan arus listrik. Karena elektron valensi bebas bergerak, maka akan dapat bergerak melalui kisi yang membentuk struktur fisik logam. Di bawah medan listrik, elektron bebas bergerak melalui logam seperti bola biliar yang saling bertabrakan, melewati muatan listrik saat bergerak. Transfer energi terkuat akan terjadi bila ada sedikit hambatan. Sebagai ilustrasi di meja biliar ketika sebuah bola mengenai bola tunggal lainnya, memberikan sebagian besar energinya ke bola berikutnya. Jika satu bola mengenai beberapa bola lainnya, masing-masing bola tersebut hanya akan membawa sebagian kecil energi. Dengan cara yang sama, konduktor listrik yang paling efektif adalah logam yang memiliki elektron valensi tunggal yang bebas bergerak dan menyebabkan reaksi tolak yang kuat pada elektron lain. Ini terjadi pada logam yang paling konduktif, seperti perak, emas dan tembaga. Masing-masing memiliki satu elektron valensi yang bergerak dengan sedikit hambatan dan menyebabkan reaksi tolak yang kuat. Logam semikonduktor atau metaloid memiliki jumlah elektron valensi yang lebih tinggi (biasanya empat atau lebih). Sehingga meskipun dapat menghantarkan listrik, namun tidak efisien dalam menjalankan tugasnya. Ketika dipanaskan atau didoping dengan elemen lain, semikonduktor seperti silikon dan germanium dapat menjadi konduktor listrik yang sangat efisien. Berikut beberapa contoh logam konduktif beserta karakteristik dan penggunaannya.

1) Tembaga

Tembaga adalah unsur kimia dengan nomor atom 29 dan nomor massa 63,54, merupakan unsur logam, dengan warna kemerahan. Unsur ini

mempunyai titik lebur 1.803°C dan titik didih 2.595°C . dikenal sejak zaman prasejarah. Tembaga sangat langka dan jarang sekali diperoleh dalam bentuk murni. Tembaga mudah didapat dari berbagai senyawa dan mineral. Tembaga memiliki banyak kegunaan yaitu dalam bentuk logam merupakan paduan penting dalam bentuk kuningan, perunggu serta campuran emas dan perak. Banyak digunakan dalam pembuatan pelat, alat-alat listrik, pipa, kawat, pematian, uang logam alat-alat dapur dan industri. Tembaga mempunyai ciri khusus seperti:

- a) Warnanya kuning dengan semburat kemerah-merahan.
- b) Sifatnya cenderung menghantarkan panas dan cocok sebagai sumber listrik karena optimal dalam mengalirkan elektron.
- c) Sifatnya cenderung keras jika tidak lagi murni.
- d) Lunak dan mudah dibentuk atau ditempa sehingga sering menjadi bahan baku dari lembaran tipis, kawat, atau lembaran pipa.
- e) Mempunyai titik didih pada 2.562 derajat Celcius, sedangkan titik lelehnya berada di $1.084,62$ derajat Celcius.

Dalam bidang kelistrikan tembaga memiliki beberapa kelebihan seperti.

- a) Mampu menghantarkan listrik sebagai konduktor yang sangat baik.
- b) Bisa dipilih untuk menambahkan ornamen pada interior rumah.
- c) Mudah dibentuk menjadi berbagai alat yang mampu memenuhi keperluan manusia.
- d) Mudah ditemukan.
- e) Dalam bidang komunikasi, unsur ini mampu meneruskan informasi hingga 900 kanal telepon.

Sedangkan kekurangan tembaga dalam bidang kelistrikan antara lain.

- a) Cenderung berbobot berat.
- b) Meskipun punya sifat konduktor sangat baik, material ini terlalu cepat panas.
- c) Kualitasnya lebih rendah dibandingkan logam mulia.

2) Alumunium

Aluminium adalah unsur kimiadengan lambangnya Al dan nomor atom 13. Aluminium bukan merupakan jenis logam berat namun merupakan elemen yang berjumlah sekitar 8% dari permukaan bumi. Alumunium adalah logam yang berwarna putih perak dan tergiling ringan dengan massa $2,7\text{ gram/cm}$ sampai 3 gram/cm . Alumunium merupakan logam

yang mahal karena pengolahannya yang sulit. Aluminium terdapat dalam penggunaan aditif makanan, antasida, buffered aspirin, astringents, semprotan hidung, antiperspirant, air minum, knalpot mobil, asap tembakau, penggunaan aluminium foil, peralatan masak, kaleng, keramik dan kembang api. Aluminium mempunyai ciri khusus seperti:

- a) Logam berwarna putih perak.
- b) Dapat ditempa dan dibentuk.
- c) Kerapatan rendah.
- d) Pengantar panas dan arus yang baik, daya hantar listrik dua kali lebih besardari Cu maka Al digunakan sebagai kabel tiang listrik.
- e) Tidak bersifat magnetik, aluminium tidak bersifat magnet sehingga sukar ditarik oleh magnet.
- f) Ringan, tahan korosi dan tidak beracun maka banyak digunakan untuk alat rumah tangga seperti panci, wajan dan lain-lain.
- g) Reflektif, dalam bentuk aluminium foil dapat digunakan sebagai pembungkus makanan, obat dan rokok.

Dalam bidang kelistrikan aluminium memiliki kelebihan seperti.

- a) Harganya terjangkau.
- b) Memiliki Kandungan logam yang ringan.
- c) Memiliki ketahanan terhadap korosi

Sedangkan kekurangan aluminium dalam bidang kelistrikan antara lain.

- a) Mudah patah atau rapuh
- b) Tidak bertahan lama

3) Baja

Baja merupakan logam yang terbuat dari besi dengan campuran karbon. Berdasarkan campuran karbonnya baja dikategorikan menjadi 3 macam yaitu baja dengan kadar karbon rendah (0-0,25%), baja dengan kadar karbon menengah (0,25-0,55%) dan baja dengan karbon tinggi diatas 0,55%. Baja memiliki keunggulan yaitu memiliki sifat penghantar panas yang baik. Digunakan pada penghantar transmisi yaitu ACSR dimana fungsi baja dalam hal ini adalah memperkuat konduktor aluminium secara mekanis setelah digalvanis dengan seng. keuntungan dipakainya baja pada ACSR adalah menghemat pemakaian aluminium. Baja mempunyai ciri khusus seperti:

- a) Titik didih 1550°C .
- b) Titik lebur 2900°C .
- c) Memiliki sifat konduktivitas listrik.
- d) Bisa menghantarkan panas.
- e) Reaktif.
- f) Jumlah elektron bebas yang tinggi pada segala bentuk logam padat menyebabkan logam tidak pernah terlihat transparan.

Dalam bidang kelistrikan baja memiliki kelebihan seperti.

- a) Kuat secara mekanis
- b) Tahan lama
- c) Mudah dibentuk

Sedangkan kekurangan baja dalam bidang kelistrikan antara lain.

- a) Mudah korosi
- b) Berkurangnya kekuatan akibat temperatur yang tinggi
- c) Harganya yang cukup mahal

4) Perak

Perak adalah unsur logam dengan nomor atom 47. Perak mempunyai konduktivitas listrik, konduktivitas termal dan reflektivitas tinggi diantara semua logam. Perak memiliki berbagai fungsi seperti pada panel surya, penyaringan air, perhiasan dan ornamen, peralatan makan dan perabotan bernilai tinggi. Perak digunakan industri dalam stop kontak dan konduktor listrik, pada cermin khusus, pelapis jendela dan dalam katalisis reaksi kimia. Senyawanya digunakan dalam film fotografi dan sinar-X. Larutan perak nitrat encer dan senyawa perak lainnya digunakan sebagai disinfektan dan mikrobisida (efek oligodinamika), ditambahkan ke perban dan pembalut luka, kateter dan peralatan medis lainnya. Perak mempunyai ciri khusus seperti:

- a) Mempunyai kilap putih.
- b) Setelah emas perak sangat lunak dibanding logam lain.
- c) Mempunyai masa jenis/kerapatan $10,5\text{ g/cm}^3$.
- d) Mempunyai titik cair 960°C dan titik didih 1955°C .
- e) Cairan perak menyerap oksigen.
- f) Nilai keelektronegatifannya Hg.
- g) Jari-jari atomnya 1,44.

Dalam bidang kelistrikan perak memiliki kelebihan seperti.

- a) Merupakan penghantar panas dan listrik yang baik, lebih baik dari Cu (tembaga).
- b) Memiliki konduksi listrik, konduktivitas termal dan reflektivitas tertinggi diantara semua jenis logam.

Sedangkan kekurangan perak dalam bidang kelistrikan antara lain.

- a) Kurang diminati untuk frekuensi tinggi karena permukaan luar menjadi kurang konduktif.

5) Seng

Seng adalah unsur kimia dengan lambang kimia Zn dan bernomor atom 30, dengan massa atom relatif 65,39. Seng merupakan unsur pertama golongan 12 pada tabel periodik. Beberapa sifat kimia seng mirip dengan magnesium (Mg), hal ini dikarenakan ion kedua unsur ini berukuran hampir sama. Selain itu, keduanya juga memiliki keadaan oksidasi +2. Pelapisan seng pada baja untuk mencegah perkaratan merupakan aplikasi utama seng, aplikasi-aplikasi lainnya meliputi penggunaannya pada baterai dan aloi. Terdapat berbagai jenis senyawa seng yang dapat ditemukan, seperti seng karbonat dan seng glukonat (suplemen makanan), seng klorida (pada deodoran), seng piriton (pada sampo anti ketombe), seng sulfida (pada cat berpendar), dan seng metil ataupun seng dietil di laboratorium organik. Dalam bahasa sehari-hari, seng juga dimaksudkan sebagai pelat seng yang digunakan sebagai bahan bangunan. Seng mempunyai ciri khusus seperti:

- a) Titik cair 419° C.
- b) Titik didih 906° C.
- c) Berat jenis 7,1.
- d) Berwarna abu-abu muda.
- e) Tahanan jenis 0,12 ohm mm²/m.

Dalam bidang kelistrikan seng memiliki kelebihan seperti.

- a) Memiliki konduktivitas yang tinggi dengan resistensi yang rendah
- b) Lebih tahan terhadap karat dibandingkan logam lain

Sedangkan kekurangan seng dalam bidang kelistrikan antara lain.

- a) Keras dan rapuh pada kebanyakan suhu
- b) Memiliki titik didih yang relatif rendah

- c) Titik lebur seng merupakan yang terendah di antara semua logam-logam transisi selain raksa dan kadmium

6) Timah

Timah adalah sebuah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki simbol Sn dan nomor atom 50. Timah termasuk logam pasca-transisi di kelompok 14 dalam tabel periodik. Timah menunjukkan kemiripan kimia dengan germanium dan timbal yang juga berada di kelompok 14 dan memiliki dua kemungkinan bilangan oksidasi, +2 dan +4 yang sedikit lebih stabil. Unsur ini merupakan logam miskin keperakan, dapat ditempa dan tidak mudah teroksidasi dalam udara sehingga tahan karat, ditemukan dalam banyak alloy dan digunakan untuk melapisi logam lainnya untuk mencegah karat. Timah diperoleh terutama dari mineral kasiterit yang terbentuk sebagai oksida. Timah mempunyai ciri khusus seperti:

- a) Mempunyai warna putih keperakan.
- b) Memiliki titik leleh $231,93^{\circ}\text{C}$.
- c) Memiliki titik didih 2602°C .

Dalam bidang kelistrikan timah memiliki kelebihan seperti.

- a) Tahan terhadap air dan air garam
- b) Sifatnya lunak, sehingga kontak dapat betul-betul baik dan mengurangi besarnya tahanan dan menghilangkan terjadinya bunga api
- c) Tahan terhadap udara lengas
- d) Tidak korosi

Sedangkan kekurangan timah dalam bidang kelistrikan antara lain.

- a) Sebagai pelapis kabel dapat membuat bobot menjadi terlalu berat
- b) Terkena korosi jika bersentuhan dengan air laut murni, air asam dan basa.

b. Logam Resistif

Konduksi dalam logam harus mengikuti Hukum Ohm, yang menyatakan bahwa arus berbanding lurus dengan medan listrik yang diterapkan pada logam. Hukum tersebut, dinamai berdasarkan fisikawan Jerman Georg Ohm, muncul pada tahun 1827 dalam sebuah makalah yang diterbitkan yang menjelaskan bagaimana arus dan tegangan diukur melalui rangkaian listrik. Variabel kunci dalam menerapkan Hukum Ohm adalah resistivitas

logam. Resistivitas adalah kebalikan dari konduktivitas listrik, yang mengevaluasi seberapa kuat suatu logam melawan aliran arus listrik. Ini biasanya diukur di seberang permukaan kubus satu meter dari material dan digambarkan sebagai ohm meter ($\Omega \cdot m$). Resistivitas sering diwakili oleh huruf Yunani rho (ρ). Konduktivitas listrik, di sisi lain, biasanya diukur dengan siemens per meter ($S \cdot m^{-1}$) dan diwakili oleh huruf Yunani sigma (σ). Satu siemens sama dengan kebalikan dari satu ohm. Berikut beberapa contoh logam resistif beserta karakteristik dan penggunaannya. Beberapa contoh bahan logam resistif diantaranya:

1) Nikel

Nikel adalah unsur kimia metalik dalam tabel periodik yang memiliki simbol Ni dan nomor atom 28. Nikel adalah logam berwarna putih keperak-perakan sedikit semburat keemasan. Nikel termasuk logam transisi dan memiliki sifat keras serta ulet, tidak korosif dan mudah dibentuk. Nikel biasa digunakan untuk elektroplating, elemen pemanas dan magnet.

2) Merkuri

Merkuri atau hydrargyrum adalah unsur kimia pada tabel periodik dengan simbol Hg dan nomor atom 80. Unsur golongan logam transisi ini berwarna keperakan dan merupakan satu dari lima unsur yang berbentuk cair dalam suhu kamar, serta mudah menguap. Hg akan memadat pada tekanan 7.640 Atm. Memiliki sifat cair dan muai merata, temperatur lebur yang rendah $38,8^{\circ} C$ serta beroksidasi dan beracun. Merkuri biasa digunakan untuk kontak rele pengaman transformator, thermometer dan lampu.

3) Tungsten

Tungsten, adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang W dan nomor atom 74. Istilah tungsten berasal dari bahasa Swedia tung sten yang berarti batu berat. Memiliki sifat temperatur lebur tinggi $3.300^{\circ} C$, cepat beroksidasi dan resistivitas besar $\rho = 5.10 \cdot 10^{-6}$. Tungsten biasa digunakan untuk filamen lampu dan tabung elektronik.

4) Karbon

Karbon atau zat arang merupakan unsur kimia yang mempunyai simbol C dan nomor atom 6 pada tabel periodik. Sebagai unsur golongan 14 pada tabel periodik, karbon merupakan unsur non-logam dan bervalensi

4, yang berarti bahwa terdapat empat elektron yang dapat digunakan untuk membentuk ikatan kovalen. Memiliki sifat keras, tahan aus dan tahan kimia, temperatur lebur tinggi 3.900°C , koefisien temperatur negatif, hambat jenis $\rho = (1 \text{ s/d } 7) \cdot 10^{-3}$, tidak beroksidasi, penghantar panas. Karbon biasa digunakan untuk elektroda tungku lebur, elektroda baterai kering, pengumpul arus, sikat mesin listrik dan resistor nilai besar daya rendah.

Tabel 8.1. Nilai Konduktivitas dan Resistivitas Logam.

Bahan	Resistivitas $\rho(\Omega\text{m})$ at 20°C	Konduktivitas $\sigma(\text{S/m})$ at 20°C
Silver	$1,59 \times 10^{-8}$	$6,30 \times 10^7$
Copper	$1,68 \times 10^{-8}$	$5,98 \times 10^7$
Annealed Copper	$1,72 \times 10^{-8}$	$5,80 \times 10^7$
Gold	$2,44 \times 10^{-8}$	$4,52 \times 10^7$
Aluminum	$2,82 \times 10^{-8}$	$3,5 \times 10^7$
Calcium	$3,36 \times 10^{-8}$	$2,82 \times 10^7$
Beryllium	$4,00 \times 10^{-8}$	$2,500 \times 10^7$
Rhodium	$4,49 \times 10^{-8}$	$2,23 \times 10^7$
Magnesium	$4,66 \times 10^{-8}$	$2,15 \times 10^7$
Molybdenum	$5,225 \times 10^{-8}$	$1,914 \times 10^7$
Iridium	$5,289 \times 10^{-8}$	$1,891 \times 10^7$
Tungsten	$5,49 \times 10^{-8}$	$1,82 \times 10^7$
Zinc	$5,945 \times 10^{-8}$	$1,682 \times 10^7$
Cobalt	$6,25 \times 10^{-8}$	$1,60 \times 10^7$
Cadmium	$6,84 \times 10^{-8}$	$1,4610^7$

Bahan	Resistivitas $\rho(\Omega\text{m})$ at 20°C	Konduktivitas $\sigma(\text{S/m})$ at 20°C
Ruthenium	$7,595 \times 10^{-8}$	$1,31 \times 10^7$
Lithium	$8,54 \times 10^{-8}$	$1,17 \times 10^7$
Iron	$9,58 \times 10^{-8}$	$1,04 \times 10^7$
Platinum	$1,06 \times 10^{-7}$	$9,44 \times 10^6$
Palladium	$1,08 \times 10^{-7}$	$9,28 \times 10^6$
Tin	$1,15 \times 10^{-7}$	$8,7 \times 10^6$
Selenium	$1,197 \times 10^{-7}$	$8,35 \times 10^6$
Tantalum	$1,24 \times 10^{-7}$	$8,06 \times 10^6$
Niobium	$1,31 \times 10^{-7}$	$7,66 \times 10^6$
Steel (Cast)	$1,61 \times 10^{-7}$	$6,21 \times 10^6$
Chromium	$1,96 \times 10^{-7}$	$5,10 \times 10^6$
Lead	$2,05 \times 10^{-7}$	$4,87 \times 10^6$
Vanadium	$2,61 \times 10^{-7}$	$3,83 \times 10^6$
Uranium	$2,87 \times 10^{-7}$	$3,48 \times 10^6$
Zirconium	$4,105 \times 10^{-7}$	$2,44 \times 10^6$
Titanium	$5,56 \times 10^{-7}$	$1,798 \times 10^6$
Mercury	$9,8 \times 10^{-7}$	$1,044 \times 10^6$

c. Logam Paduan

Logam paduan adalah campuran dari logam atau sebuah campuran logam dan elemen lainnya. Paduan dicirikan dengan karakter perekatan yang metalik. Paduan bisa merupakan larutan padat dari unsur-unsur logam (satu

fasa) atau campuran logam berbagai fase (dua atau lebih solusi). Senyawa intermetalik ialah paduan dengan stoikiometri yang terlihat dan struktur berbentuk kristal. Logam paduan dapat digunakan dalam berbagai macam aplikasi. Dalam beberapa kasus, kombinasi dari logam dapat mengurangi biaya keseluruhan dari bahan sambil tetap menjaga sifat penting benda tersebut. Dalam kasus lain, kombinasi dari logam menanamkan sifat sinergis untuk unsur-unsur logam seperti ketahanan korosi atau kekuatan mekanik. Konstituen dari paduan biasanya diukur dengan presentasi massa dari susunan elemennya untuk aplikasi praktis, dan dalam fraksi atom untuk studi ilmu dasar. Paduan biasanya diklasifikasikan sebagai paduan substitusi atau interstisial, tergantung pada susunan atom yang membentuk paduan tersebut. Bahan ini dapat lebih diklasifikasikan sebagai homogen (terdiri dari satu fasa) atau heterogen (terdiri dari dua atau lebih fase) atau intermetalik. Logam paduan (*metal alloy*) sering digunakan sebagai pengganti logam murni karena pada logam paduan memiliki sifat yang dapat memberikan keuntungan dan kemudahan sebagai material pabrikasi seperti kekerasan pada logam paduan dapat ditingkatkan dari kekerasan logam asalnya, kekuatan tarik dapat diperbesar, daya pemuatan dapat dikurangi, titik lebur dapat diturunkan atau dinaikkan dibanding logam-logam asalnya. Sifat-sifat tersebut itulah yang tidak dimiliki logam murni sehingga logam murni dapat ditambahkan unsur logam lainnya untuk mendapatkan kelebihan-kelebihan dari sifat-sifat tersebut. Berikut beberapa contoh logam paduan beserta karakteristik dan penggunaannya.

C. Latihan Soal

Tentukan parameter kisi dan volum unit sel dari unsur logam berikut:

No	Logam	Struktur kristal	Radius atom (nm)
1.	Zinc	HCP	0.1332
2.	Cadmium	HCP	0.1490

3.	Chromium	BCC	0.1249
4.	Gold	FCC	0.1442
5.	Nickel	FCC	0.1246

D. Daftar Pustaka

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.

Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi

Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.

Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 9

BAHAN KONDUKTOR

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan jenis dan bagaimana mekanisme hantaran arus listrik pada bahan konduktor.

B. Uraian Materi

1. Bahan Konduktor

Konduktor merupakan bahan yang mudah menghantarkan arus listrik karena memiliki elektron bebas. Bahan konduktor dapat berupa zat padat, cair atau gas. Pada logam jumlah elektron bebas memiliki energi yang cukup besar, cukup banyak dan bebas bergerak. Selain itu konduktor listrik juga baik dalam menghantarkan energi termal. Bahan konduktor sangat umum digunakan pada perangkat yang memerlukan transfer energi yang cepat. Elektron bebas pada konduktor dapat bergerak dengan bebas dengan gerakan secara acak dalam ruang diantara atom yang disebut dengan difusi. Konduktor yang baik memiliki hambatan jenis yang rendah. Berikut ini adalah karakteristik konduktor logam.

a. Emas

Emas memiliki konsentrasi elektron bebas sebesar $5,90 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. Konduktivitas listrik elektron sangat baik dan telah digunakan untuk jaringan kabel listrik. Nilai konduktivitas listrik emas bernilai $6,17 \times 10^7 \text{ S/m}$. Namun harganya yang relatif mahal penggunaannya tidak seluas penggunaan tembaga atau perak. Emas memiliki ketahanan korosi yang baik namun dapat bereaksi dengan klorin bebas. Emas digunakan sebagai lapisan tipis konektor elektris seperti pada konektor audio, video dan kabel USB.

b. Tembaga

Tembaga adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Cu dan nomor atom 29. Lambangnya berasal dari bahasa Latin Cuprum. Tembaga merupakan konduktor panas dan listrik yang baik. Selain itu unsur ini memiliki korosi yang cepat sekali. Tembaga murni sifatnya halus

dan lunak, dengan permukaan berwarna jingga kemerahan. Konfigurasi atom Cu adalah : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$, sehingga Cu cenderung melepaskan 1 elektron valensinya dan sangat baik jika digunakan sebagai konduktor dan mudah untuk didapatkan.

c. Aluminium

Aluminium merupakan konduktor listrik yang baik, ringan dan kuat. Merupakan konduktor yang baik juga buat panas. Dapat ditempa menjadi lembaran, ditarik menjadi kawat dan diekstrusi menjadi batangan dengan bermacam-macam penampang. Selain itu aluminium memiliki ketahanan terhadap korosi.

d. Kuningan

Kuningan merupakan paduan dari tembaga dan seng, proporsi seng dan tembaga dapat bervariasi untuk menciptakan berbagai kuningan dengan sifat yang bervariasi. Sebagai perbandingan, perunggu pada prinsipnya paduan tembaga dan timah. Bronze tidak selalu mengandung timah, dan berbagai paduan tembaga, termasuk paduan dengan arsen, fosfor, aluminium, mangan, dan silikon, yang biasanya disebut "perunggu". Karena kuningan paduan dari tembaga dan seng, itulah sebabnya kuningan dapat menghantarkan listrik.

e. Tungsten

Nama "tungsten" (dari Nordic *sten tung*, yang berarti "batu berat") digunakan dalam bahasa Inggris, Perancis, dan bahasa lainnya sebagai nama elemen. Tungsten adalah nama Swedia tua untuk scheelite mineral. Nama lain "wolfram" (atau "volfram"), yang digunakan misalnya dalam kebanyakan bahasa Eropa (terutama Jerman dan Slavia), berasal dari mineral wolframite, dan ini juga merupakan asal dari simbol kimia, W. Nama "wolframite" berasal dari bahasa Jerman "serigala Rahm" ("serigala jelaga" atau "krim serigala"), nama yang diberikan untuk tungsten oleh Johan Gottschalk Wallerius pada tahun 1747. Hal ini, pada gilirannya, berasal dari "Lupi spuma", nama Georg Agricola digunakan untuk elemen tahun 1546, yang diterjemahkan ke dalam bahasa Inggris sebagai "buih serigala" atau "krim".

f. Nikel

Nikel adalah salah satu dari empat elemen yang feromagnetik sekitar temperatur kamar. Alnico magnet permanen berdasarkan sebagian pada nikel adalah kekuatan penengah antara berbasis besi magnet permanen dan jarang magnet bumi. Logam ini sangat berharga dalam dunia modern untuk

membentuk paduan, sekitar 60% dari produksi dunia digunakan dalam nikel baja (terutama stainless steel). Paduan umum lainnya, serta beberapa superalloy baru, membentuk sebagian besar dari sisa penggunaan nikel dunia, dengan menggunakan kimia untuk senyawa nikel mengkonsumsi kurang dari 3% dari produksi. Sebagai suatu senyawa, nikel memiliki sejumlah kimia niche pembuatannya menggunakan, seperti katalis untuk hidrogenasi. Enzim beberapa mikroorganisme dan tumbuhan mengandung nikel sebagai pusat aktif, yang membuat logam merupakan nutrisi penting bagi bahan ini.

g. Besi

Besi adalah logam yang berasal dari bijih besi (tambang) yang banyak digunakan untuk kehidupan manusia sehari-hari. Dalam tabel periodik, besi mempunyai simbol Fe dan nomor atom 26. Besi juga mempunyai nilai ekonomis yang tinggi. Salah satu kelemahan besi adalah mudah mengalami korosi. Korosi menimbulkan banyak kerugian karena mengurangi umur pakai berbagai barang atau bangunan yang menggunakan besi atau baja.

h. Merkuri

Merkuri adalah logam yang dalam keadaan normal berbentuk cairan berwarna abu-abu, tidak berbau dengan berat molekul 200,59. Tidak larut dalam air, alkohol, eter, asam hidroklorida, hidrogenbromida dan hidrogen iodide; Larut dalam asam nitrat, asam sulfurik panas dan lipid. Tidak tercampurkan dengan oksidator, halogen, bahan-bahan yang mudah terbakar, logam, asam, logam carbide dan amine. Toksisitas merkuri berbeda sesuai bentuk kimianya, misalnya merkuri inorganik bersifat toksik pada ginjal, sedangkan merkuri organik seperti metil merkuri bersifat toksis pada sistim syaraf pusat.

i. Grafit

Merupakan modifikasi dari karbon yang memiliki karakteristik serupa dengan logam dalam hal menghantarkan panas dan listrik dengan baik. Grafit banyak digunakan sebagai elektroda, penyekat dan aditif bahan pelumas.

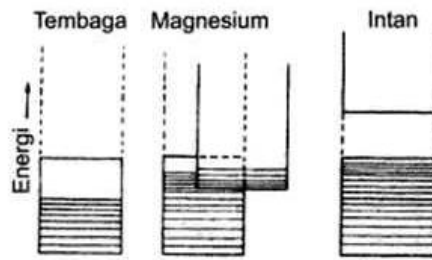
j. Air Laut

Kadat garam air laut memiliki nilai rata-rata berkisar 3,5%. Kadar garam pada air laut berasal dari garam mineral yang terdapat pada batu-batuan dan tanah. Umumnya kandungan garam pada air laut mengandung natrium, kalium dan kalsium. Air dari sungai yang mengalir ke lautan juga membawa garam. Ombak ditepi pantai yang menghantam batuan atau daratan dapat memberikan sumbangsih garam.

Ciri karakteristik logam adalah konduktivitas listrik yang sangat tinggi karena elektron bergerak dengan mudah melalui kisi. Konduktivitas termal logam yang tinggi dijelaskan dengan penyebab sama, dan hukum Wiedmann-Franz menunjukkan bahwa rasio konduktivitas listrik dan konduktivitas termal pada temperatur sama hampir serupa untuk berbagai jenis logam. Konduktivitas timbul karena elektron mudah bergerak dalam kisi dan tahanan terjadi akibat hamburan gelombang oleh ketidakaturan acak dalam susunan kisi. Ketidakaturan ditimbulkan oleh beberapa sumber penyebab, seperti temperatur, perpaduan, deformasi atau iradiasi nuklir yang semuanya menimbulkan gangguan pada keteraturan kisi.

Pada logam umumnya tahanan mendekati nol pada titik nol absolut, tetapi pada beberapa jenis logam (seperti timah hitam, timah putih dan air raksa) tahanan akan mencapai nol pada temperatur kritis tertentu di atas 0 K. Logam seperti ini dikenal sebagai superkonduktor. Dalam menjelaskan sifat listrik dikenalkan konsep struktur pita dan elektron dianggap sebagai bergerak terus menerus dalam struktur dengan energi bergantung pada level pita energi yang ditempatinya. Bagi elektron, susunan atom teratur dalam kisi metalik merupakan kisi difraksi tiga-dimensional karena atom bermuatan positif dan berinteraksi dengan elektron yang bergerak. Pada panjang gelombang tertentu, elektron akan mengalami efek difraksi yang kuat bergantung pada jarak atom dalam kisi metalik. Oleh karena itu, elektron yang memiliki energi bersesuaian dengan panjang gelombang tersebut tidak dapat bergerak dengan bebas dalam struktur. Akibatnya, pada pita elektron, beberapa level energi tidak dapat ditempati sehingga terjadi sebarang energi di pita yang sesungguhnya merupakan spektrum energi kontinu.

Pada uraian interaksi kisi-elektron memanfaatkan diagram vektor, di mana arah vektor sama dengan arah gerak elektron dan besarnya adalah nomor gelombang elektron. Vektor yang mewakili elektron dengan nilai energi sedemikian sehingga akibat efek difraksi tidak dapat menembus kisi, akan membentuk terbentuk zona Brillouin yang merupakan gambaran permukaan tiga-dimensional. Keberadaan zona Brillouin bergantung pada arah kisi, maka terdapat rentang nilai energi yang tidak dapat ditempati elektron.



Gambar 9.1. Skema Zona Brillouin.

Jadi suatu zona Brillouin dikatakan terisi apabila setiap atom logam memberikan dua buah elektron pada pita. Jika atom logam memberikan lebih dari dua buah elektron per atom, kelebihan elektron tersebut akan dirempatkan di zona kedua atau zona yang lebih tinggi. Konduksi listrik akan terjadi bila energi elektron pada puncak pita meningkat dan akan mengalir searah dengan arah potensialnya. Apabila ada celah kesenjangan energi antara dua zona dan zona yang lebih rendah terisi penuh, diperlukan energi yang besar untuk membuat elektron agar dapat melompat ke tingkatan yang lebih tinggi. Pada konduktor hampir tidak terdapat celah kesenjangan energi seperti ini, sehingga elektron dari pita valensi akan mengisi pita konduksinya. Berbeda untuk bahan isolator atau dengan bahan semikonduktor.

Pada intan besar celah kesenjangan energi ini sebesar 6 eV. Diperlukan medan listrik sangat tinggi untuk meningkatkan elektron ke pita yang lebih tinggi dan intan dikenal sebagai bahan isolator. Apabila celah kesenjangan cukup kecil, seperti pada siliko sebesar 1,1 eV, maka energi termal cukup memadai untuk mengeksitasi beberapa elektron ke pita energi yang lebih tinggi serta juga menimbulkan kekosongan dalam pita valensi, bahan ini disebut semikonduktor. Umumnya, pita energi terendah yang tidak terisi penuh dengan elektron disebut pita konduksi, dan pita yang mengandung elektron valensi disebut pita valensi. Pada konduktor, pita valensi sekaligus merupakan pita konduksi. Isolator dapat juga mengalami modifikasi akibat temperatur tinggi atau penambahan pengotor. Jelas bahwa isolator dapat berubah menjadi konduktor pada temperatur tinggi apabila agitasi termal cukup memadai sehingga elektron dapat melampaui senjang energi dan melompat memasuki zona kosong di atasnya.

Hukum Ohm menyatakan arus listrik yang mengalir dalam konduktor sebanding dengan medan listrik yang berkerja serta berbanding terbalik dengan hambatannya.

$$I = \frac{V}{R} \quad (9.1)$$

dengan R adalah hambatan listrik dari bahan yang dialiri listrik. Satuan untuk V, I dan R adalah volt ($V = J/C$), ampere ($A = C/s$) dan ohms ($\Omega = V/A$).

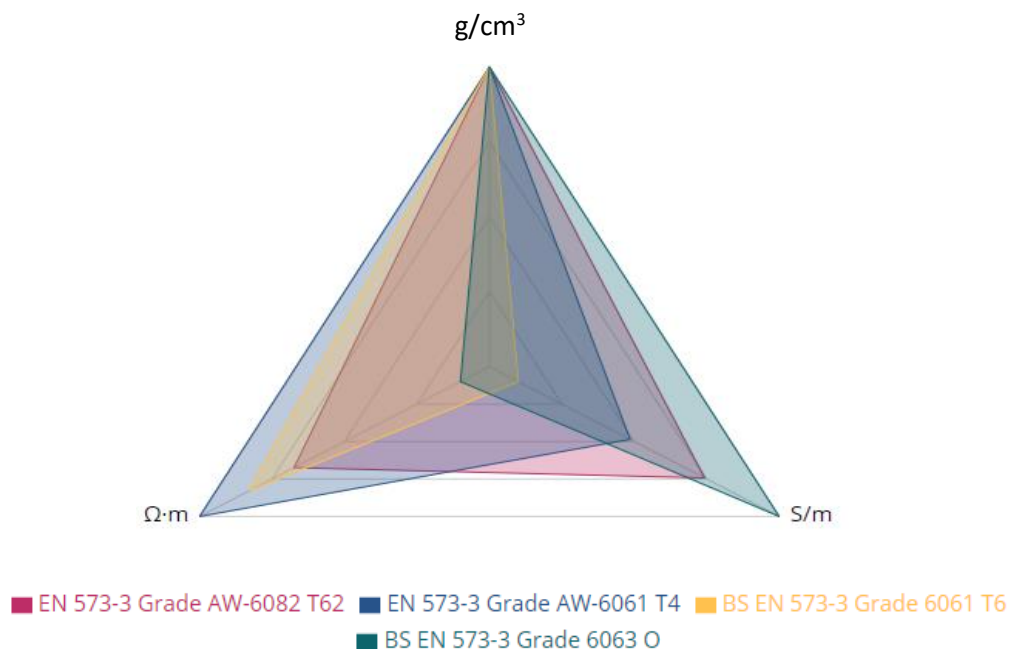
Dalam larutan padat suatu paduan adanya impuritas nilai resistivitas dari impuritas ρ_i dipengaruhi oleh konsentrasi c_i dalam satuan fraksi atom (at%/100) dengan persamaan sebagai berikut,

$$\rho_i = A c_i (1 - c_i) \quad (9.2)$$

dimana A adalah konstanta bebas dari komposisi yang merupakan fungsi dari impuritas dan logam utamanya. Untuk paduan yang mengandung dua fasa, persamaan aturan campurannya dapat dipergunakan untuk menghitung resistivitasnya

$$\rho_i = \rho_a V_a + \rho_b V_b \quad (9.3)$$

Konduktivitas konduktor dipengaruhi oleh temperatur, unsur pemadu/impuritas, deformasi pada bahan dan radiasi. Pada Gambar 9.2 disajikan perbandingan beberapa jenis paduan aluminium dengan karakteristik densitas, resistivitas listrik volum dan konduktivitas listriknya.



Gambar 9.2 Diagram Perbandingan Densitas, Resistivitas Listrik Volum dan Konduktivitas Listrik dari Paduan Aluminium.

Keempat paduan aluminium tersebut memiliki densitas yang sama yaitu $2,7 \text{ g/cm}^3$. Sedangkan untuk konduktivitas listrik dan resistivitas listrik volum disajikan pada Tabel 9.1 berikut ini,

Tabel 9.1 Perbandingan Nilai Resistivitas Listrik Volum dan Konduktivitas Listrik dari Paduan Aluminium

No	Paduan	Konduktivitas Listrik pada 20 °C (10^7 S/m)	Resistivitas listrik volum pada 20 °C ($10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)
1.	EN 573-3 Grade AW-6082 T62	2,40 - 3,20	3,13 - 4,17
2.	EN 573-3 Grade AW-6061 T4	2,00 - 3,00	3,33 - 4,55
3.	BS EN 573-3 Grade AW-6061 T6	2,30 - 2,70	3,70 - 4,35
4.	BS EN 573-3 Grade 6063 O	2,90 - 3,40	2,90 - 3,50

2. Klasifikasi Bahan Konduktor

Klasifikasi bahan konduktor dapat dianalisa berdasarkan komposisi komponen, konstruksi dan bentuk fisiknya.

a. Klasifikasi Bahan Konduktor Berdasarkan Komposisi Komponen

Berdasarkan komposisi komponennya maka klasifikasi bahan konduktor dibagi menjadi:

1) Kawat Logam Biasa

Kawat logam biasa adalah benda yang terbuat dari logam yang memiliki tekstur panjang dan lentur. Kawat logam biasa merupakan benda penghantar listrik yang baik. Kawat logam biasa mempunyai banyak bentuk dan ukuran. Kawat logam biasa yang digunakan untuk menjadi penghantar listrik yang mana biasanya dibungkus dengan kulit yang terbuat dari karet atau biasa disebut sebagai kabel. Contoh kawat logam

biasa seperti BBC (*Bare Copper Conductor*) dan AAC (*All Aluminum Alloy Conductor*).

2) Kawat Logam Campuran

Kawat logam campuran atau alloy adalah sebuah logam dari tembaga atau aluminium yang diberi campuran dalam jumlah tertentu dari logam jenis lain, yang berguna untuk menaikkan kekuatan mekanisnya. Contoh kawat logam campuran seperti AAAC (*All Aluminum Alloy Conductor*), kawat logam paduan (kawat baja berlapis tembaga (*Copper Clad Steel*) dan kawat baja berlapis aluminium (*Aluminum Clad Steel*)).

3) Kawat Lilit Campuran

Kawat lilit campuran merupakan kawat yang komposisi lilitannya terdiri dari dua jenis logam atau lebih, dua jenis logam atau lebih yang dipadukan dengan cara kompresi, peleburan (*smelting*) atau pengelasan (*welding*). Contoh kawat lilit campuran seperti ASCR (*Aluminum Cable Steel Reinforced*).

b. Klasifikasi Bahan Konduktor Berdasarkan Konstruksinya

Berdasarkan konstruksinya maka klasifikasi bahan konduktor dapat dibagi menjadi:

1) Kawat Padat (*Solid Wire*) Berpenampang Bulat

Kawat padat (*solid wire*) berpenampang bulat atau biasa disebut penghantar pejal (*solid*) merupakan penghantar yang berbentuk kawat pejal yang berukuran sampai 10 mm². Kawat tersebut tidak dibuat lebih besar lagi dari ukuran 10 mm² agar memudahkan penggulungan maupun pemasangannya.

2) Kawat Berlilit (*Standart Wire*)

Kawat berlilit adalah kawat yang terdiri dari 7 sampai dengan 61 kawat padat yang dililit menjadi satu, biasanya berlapis dan konsentris. Bila dikehendaki dapat dibuat penampang yang lebih besar (>10 mm²), maka digunakan susunan berlilit yang umumnya terdiri 7 sampai dengan 6 buah kawat tunggal yang dililit menjadi satu. Kawat ini juga dapat digunakan untuk mengurangi Skin Effect.

3) Kawat Berongga (*Hollow Conductor*)

Kawat berongga adalah kawat yang dibuat dengan desain memiliki rongga yang dibuat untuk mendapatkan garis tengah luar yang besar. Kawat berongga yang dibuat dengan tujuan untuk mendapatkan garis

tengah luar konduktor yang lebih besar, sehingga pendinginnya lebih sempurna dan untuk didapatkan sifat kekakuan. Penggunaan kawat ini misalnya pada bus bar G1.

4) Kawat serabut

Kawat serabut banyak digunakan untuk tempat-tempat yang sulit dijangkau dan sempit, jenis kawat ini biasanya digunakan untuk alat-alat portabel, alat-alat ukur listrik dan pada kendaraan bermotor. Ukuran kabel pada jenis kawat ini memiliki kisaran antara 0,5 mm² sampai dengan 400 mm².

c. Klasifikasi Bahan Konduktor Menurut Bentuk Fisiknya

Berdasarkan bentuk fisiknya maka klasifikasi bahan konduktor dapat dibagi menjadi:

1) konduktor Telanjang

Konduktor telanjang merupakan konduktor yang bagian luarnya tidak diisolasi

2) Konduktor Berisolasi

Konduktor berisolasi merupakan konduktor telanjang yang pada bagian luarnya diisolasi sesuai dengan peruntukan tegangan kerja, isolasi adalah bahan yang berfungsi untuk menyekat (misalnya antara 2 penghantar), agar tidak terjadi aliran listrik/kebocoran arus apabila kedua penghantar tersebut bertegangan. Jadi bahan penyekat harus mempunyai tahanan jenis besar dan tegangan tembus yang tinggi. Bahan penyekat yang sering ditemui dalam teknik listrik adalah: plastik, karet, kayu dan lain sebagainya. Contoh dan penjelasan terkait dengan jenis-jenis konduktor berisolasi diantaranya:

a) Kabel NYA

Kabel NYA memiliki inti tunggal, berlapis bahan isolasi PVC untuk instalasi luar atau kabel udara. Kode warna isolasi adalah warna merah, kuning, biru dan hitam sesuai dengan peraturan PUIL (Persyaratan Umum Instalasi Listrik). Lapisan isolasinya hanya 1 lapis sehingga mudah cacat, tidak tahan air (NYA adalah tipe kabel udara) dan mudah digigit tikus. Agar aman memakai kabel tipe ini, kabel harus dipasang dalam pipa/conduit jenis PVC atau saluran tertutup sehingga tidak mudah menjadi sasaran gigitan tikus dan

apabila ada isolasi yang terkelupas tidak tersentuh langsung oleh manusia.

b) Kabel NYM

Kabel NYM memiliki lapisan isolasi PVC (biasanya warna putih atau abu-abu), kabel ini ada yang berinti 2, 3 atau 4. Kabel NYM memiliki lapisan isolasi dua lapis sehingga tingkat keamanannya lebih baik dari kabel NYA namun memiliki harga yang lebih mahal dari kabel NYA. Kabel ini dapat dipergunakan dilingkungan yang kering dan basah namun jenis kabel NYM tidak boleh ditanam baik dalam tanah maupun dalam bangunan.

c) Kabel NYAF

Kabel NYAF merupakan jenis kabel fleksibel yang memiliki penghantar tembaga serabut berisolasi PVC. Kabel ini biasanya digunakan untuk instalasi panel-panel yang memerlukan bahan dengan fleksibilitas yang tinggi.

d) Kabel NYY

Kabel NYY memiliki lapisan isolasi PVC (biasanya berwarna hitam), jenis kabel ini ada yang berinti 2, 3 atau 4. Kabel NYY dipergunakan untuk instalasi tertanam (kabel tanah) dan memiliki lapisan isolasi yang lebih kuat dibandingkan dengan kabel NYM, harga kabel ini lebih mahal dari kabel NYM. Kabel NYY memiliki isolasi yang terbuat dari bahan yang tidak disukai tikus.

e) Kabel NYFGbY

Kabel NYFGbY biasanya digunakan untuk instalasi bawah tanah, di dalam ruangan di dalam saluran-saluran dan pada tempat-tempat yang terbuka dimana perlindungan terhadap gangguan mekanis dibutuhkan, atau untuk tekanan rentangan yang tinggi selama dipasang dan dioperasikan.

f) Kabel ACSR (*Aluminum Conduct Steel Reinforced*)

Kabel ACSR merupakan kawat penghantar yang terdiri dari aluminium berinti kawat baja. Kabel ini digunakan untuk saluran-saluran transmisi tegangan tinggi, dimana jarak antara menara atau tiang berjauhan, mencapai ratusan meter, maka dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi, untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.

g) Kabel AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*)

Kabel AAAC terbuat dari aluminium magnesium silicon campuran logam, keterhantaran listrik tinggi yang berisi magnesium silicide, untuk memberi sifat yang lebih baik. Kabel ini biasanya dibuat dari paduan aluminium 6201. AAAC mempunyai sifat anti karat dan kekuatan yang lebih tahan lama sehingga memiliki daya hantar yang lebih baik.

3. Kriteria Mutu Penghantar

Konduktivitas logam penghantar sangat dipengaruhi oleh unsur-unsur pemuat, *impurity* atau ketidaksempurnaan dalam kristal logam, yang ketiganya banyak berperan dalam proses pembuatan penghantar itu sendiri. Unsur-unsur pemuat selain mempengaruhi konduktivitas listrik, akan mempengaruhi sifat-sifat mekanika dan fisika lainnya. Logam murni memiliki konduktivitas listrik yang lebih baik dari pada yang lebih rendah kemurniannya. Akan tetapi kekuatan mekanis logam murni adalah rendah. Penghantar tenaga listrik selain mensyaratkan konduktivitas yang tinggi juga membutuhkan sifat mekanis dan fisika tertentu yang disesuaikan dengan penggunaan penghantar itu sendiri. Disamping persyaratan sifat listrik seperti konduktivitas listrik diatas, kriteria mutu lainnya yang juga harus dipenuhi meliputi seluruh atau sebagian dari sifat-sifat atau kondisi berikut ini, yaitu:

- a. Komposisi kimia.
- b. Sifat tarik seperti kekuatan tarik (*tensile strength*) dan regangan tarik (*elongation*).
- c. sifat bending.
- d. Diameter dan variasi yang diijinkan.
- e. Kondisi permukaan kawat harus bebas dari cacat.

Untuk menghindari terjadinya kerusakan yang disebabkan oleh ketidakmampuan penghantar mengalirkan arus listrik maka menurut PUIL 2000 semua penghantar yang digunakan harus dibuat dari bahan yang memenuhi syarat, sesuai dengan tujuan penggunaannya serta telah diperiksa dan diuji menurut standar penghantar yang dikeluarkan atau diakui oleh instansi yang berwenang. Selain itu untuk menghindari terjadinya kerusakan pada sebuah penghantar, maka luas penampang penghantar harus diperhitungkan dengan teliti, karena kerusakan pada sebuah penghantar dapat diakibatkan oleh arus

yang melalui penghantar tersebut melebihi kapasitas KHAnya. Dimana kapasitas KHA penghantar adalah 125% dari arus nominal.

C. Latihan Soal

1. Tentukan konduktivitas listrik dari paduan 85 wt% Cu-15 wt% Zn.
2. Paduan tembaga dengan timah memiliki komposisi 89 wt% Cu dan 11 wt% Sn. pada temperatur kamar terdiri atas dua fasa yaitu fasa α dengan kandungan terbesar tembaga dan timah yang sangat kecil dan fasa ϵ yang tepat 37 wt% timah. Tentukan konduktivitas listrik pada temperatur kamar bila diketahui fasa α memiliki hambatan listrik $1,88 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ dengan densitas $8,94 \text{ g/cm}^3$, sedangkan fasa ϵ memiliki hambatan listrik $5,32 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ dengan densitas $8,25 \text{ g/cm}^3$.
3. Bila diketahui suatu paduan Cu-Ni memiliki $2,5 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ pada temperatur kamar. Tentukan komposisi Cu dan Ni dalam persen berat.

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga

PERTEMUAN 10

BAHAN MAGNETIK

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan jenis dan sifat-sifat kemagnetan pada bahan magnetik.

B. Uraian Materi

1. Bahan Magnetik

Dalam sebuah bahan agar dapat bersifat magnetik diperlukan energi untuk memindahkan batas domain yang bergantung pada energi batas yang besarnya bergantung pada anisotropi magnetik. Regangan internal bahan dan adanya pengotor mempengaruhi magnetisasi suatu bahan. Bahan dengan regangan internal akan sulit dimagnetisasi ataupun didemagnetisasi. Regangan internal mempengaruhi kekerasan mekanik, dimana prinsip ini mendasari desain paduan magnetik permanen. Untuk bahan magnet lunak, secara mekanik memiliki sifat yang lebih rendah.

Bahan magnet lunak umumnya digunakan untuk laminasi transformator dan jangkat magnet yang memerlukan nilai permeabilitas tinggi dengan histeresis yang rendah. Paduan besi-silikon atau besi-nikel merupakan bahan yang digunakan untuk keperluan ini. Pengembangan bahan magnet lunak menunjukkan unsur pepaduan yang membentuk larutan padat interstisi dengan besi mampu memperlebar kalang histeresis dengan baik. Paduan besi silikon dimana silikon dapat menurunkan jumlah karbon terlarut dan memiliki peran membentuk kalang γ dan dengan demikian menghilangkan regangan transformasi dan juga meningkatkan pengendalian orientasi. Pada produksi paduan besi-silikon, faktor yang dikendalikan mencakup ukuran butir, perbedaan orientasi dari butir ke butir, dan adanya inklusi nonmagnetik karena merupakan sumber utama gaya koersif. Gaya koersif bertambah dengan mengecilnya besar butir karena pola domain yang berdekatan dengan batas-butir rumit akibat adanya perbedaan orientasi antara dua butir berdekatan. Pola domain yang rumit juga terdapat dipermukaan-bebas logam kecuali apabila

permukaan sejajar dengan arah magnetisasi-mudah. Oleh karena itu, untuk mengurangi gaya koersif dilakukan tahapan pengerolan dan anil untuk menghasilkan bahan dengan orientasi yang diutamakan dengan "tekstur - s" yang kuat, yaitu bahan dengan dua arah $\langle 100 \rangle$ dalam bidang. Prosedur ini sangat penting, karena bahan transformator digunakan dalam bentuk lembaran tipis untuk mengurangi kehilangan arus-eddy. Penggunaan Fe-Si-B dalam keadaan amorf untuk transformator makin meningkat.

Untuk paduan besi-nikel atau permalloy, karakteristiknya yang memiliki nilai permeabilitas tinggi, digunakan sebagai bahan untuk komponen dalam rekayasa perangkat komunikasi. Paduan besi-nikel dengan kadar nikel berkisar 40 – 55% akan memiliki permeabilitas tinggi dalam medan yang berkekuatan rendah dibandingkan besi anil. Pada kandungan nikel berkisar 50% atau dikenal sebagai paduan hypenick, memiliki permeabilitas yang bisa mencapai 70000. Komposisi superkisi paduan nikel yang memiliki nilai permeabilitas tertinggi adalah FeNi₃. Pengembangan yang dilakukan terhadap bahan ini adalah pemberian perlakuan panas dalam medan magnet kuat. Hasil dari perlakuan ini menghasilkan bahan Permalloy 65 yang memiliki permeabilitas sebesar 260000. Hal ini bisa dicapai diduga selama proses pengarahan domain bahan mengalami deformasi plastis dan pelepasan regangan magnetostriktif.

Bahan yang secara magnetis keras digunakan untuk aplikasi yang memerlukan medan magnet "permanen", namun tidak dapat digunakan. Elektromagnet, seperti pada jam listrik, meteran, dan sebagainya. Untuk keperluan ini umumnya dipakai bahan paduan, termasuk paduan Alnico (Al-Ni-Co), paduan CuNiCo (Cu-Ni-Co), ferit {barium dan strontium}, paduan samarium-kobalt (SmCo₅ dan Sm₂ (Co,Fe,Cu,Zr)₁₇) dan Neomax (Nd₂Fe₁₄B). Paduan Alnico memiliki nilai remanen yang tinggi tetapi nilai koersifnya kurang baik. Bahan ferite memiliki remanen yang agak rendah dengan koersif yang baik dan merupakan bahan baku yang sangat murah. Magnet tanah-jarang mempunyai kinerja tinggi tetapi mahal, meskipun paduan berbasis-Nd lebih murah dibandingkan dengan paduan berbasis-Sm.

Prinsip dalam pengembangan bahan magnet-keras adalah mendapatkan teknik memproduksi bahan dengan matriks dan mengandung partikel fasa kedua yang halus dan tersebar merata, melalui perpaduan dan perlakuan panas. Presipitat halus ini yang umumnya mempunyai parameter kisi berbeda dengan matriks, menimbulkan regangan koheren dalam kisi yang mempengaruhi

pergerakan batas domain. Paduan tembaga-nikel-besi, tembaga-nikel-kobalt dan aluminium-nikel-kobalt termasuk dalam tipe ini. Kemajuan penting di bidang ini adalah menghasilkan ukuran partikel yang demikian kecilnya, misalnya berdiameter kurang dari ratusan nanometer, sehingga setiap butir hanya terdiri dari domain tunggal. Jadi, magnetisasi tercapai dengan rotasi arah magnetisasi secara “en bloc”. Paduan Alnico yang mengandung Al 6-12%, Ni 14-25%, Co 0-35%, Ti 0-8%, Cu 0-6% dalam Fe 40-70%, memiliki ciri ini dan merupakan bahan magnet permanen komersial yang paling penting. Alnico adalah paduan penguatan presipitasi dan dengan perlakuan-panas didapatkan presipitat berbentuk batang (30 nm x 100 nm) yang terletak pada arah $\langle 100 \rangle$ dalam matriks BCC. Selama anil magnetik batang terbentuk pada arah $\langle 100 \rangle$ yang paling dekat dengan arah medan, dan remanen serta koersivitas meningkat tajam. Paduan $\text{Sm}_2(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_{17}$ juga bergantung pada penguncian domain magnetik oleh presipitat halus. Terdapat hubungan yang jelas antara kekerasan mekanik dan koersivitas intrinsik. Magnet SmCo_5 bergantung pada anisotropi magnetokristalin yang sangat tinggi dan butir individu merupakan partikel domain-tunggal. Keunggulan utama dari magnet jenis ini dibandingkan dengan paduan Alnico terletak pada koersivitasnya yang lebih tinggi.

Paduan Heusler, tembaga-mangan-aluminium, juga penting karena terdiri dari bahan nonferomagnetik tetapi memiliki sifat feromagnetik. Magnetisme pada kelompok ini terkait dengan senyawa Cu_2MnAl terutama karena kehadiran atom mangan. Senyawa ini memiliki superkisi tipe-FeAl apabila dilakukan pendinginan cepat dari 800°C , dan bersifat feromagnetik, akan tetapi apabila paduan didinginkan perlahan-lahan paduan memiliki struktur γ dan bersifat nonmagnetik. Hal ini mungkin karena gaya pertukaran dihasilkan oleh pengaturan kembali kisi sewaktu penataan. Perilaku sama dijumpai baik pada sistem tembaga-mangan-galium maupun sistem tembaga-mangan-indium.

Gejala tertata-tak-tertata juga memiliki arti penting magnetik bagi berbagai sistem lain. Sesuai pembahasan sebelumnya, apabila penataan diiringi oleh perubahan struktur, seperti dari kubik ke tetragonal, timbul regangan koheren yang seringkali menghasilkan kekerasan magnetik. Pada FePt , misalnya, dihasilkan gaya koersif sangat tinggi apabila didinginkan dengan cepat. Namun, karena perubahan sifat mekanik yang menyertai transformasi ternyata kecil, diperkirakan bahwa sifat magnetik yang keras dalam paduan ini merupakan efek

ukuran-partikel kecil, yang terjadi karena keadaan laminasi halus dari struktur. Selain bahan dia-, para- dan feromagnetik yang lazim, terdapat bahan tertentu yang disebut antiferomagnetik; pada bahan jenis ini momen bersih dari atom bertetangga mempunyai arah berlawanan, yaitu antiparalel. Bahan ini meliputi berbagai oksida dan klorida logam transisi, termasuk kromium dan mangan- α serta paduan mangan tembaga. Beberapa ciri relevan anti-feromagnetisme mirip dengan feromagnetisme, dan dirangkum sebagai berikut:

- a. Umumnya, arah magnetisasi paralel atau anti paralel dengan sumbu kristalografi, misalnya pada MnI dan CoO , momen ion Mn^{2+} dan Co^{2+} diarahkan mengikuti sisi kubus sel satuan. Arah bersama ini disebut arah antiferomagnetisme.
- b. Derajat tatanan anti-feromagnetik rentang-jauh berkurang secara progresif dengan meningkatnya temperatur dan menjadi nol pada temperatur kritis, T_n , juga disebut temperatur Neel; yang khusus untuk ekivalen antiferomagnetik dari temperatur Curie.
- c. Domain anti-feromagnetik adalah daerah dengan satu arah bersama untuk antiferomagnetisme, hal ini mungkin dipengaruhi oleh cacat dan regangan kisi.
- d. Karakteristik khas bahan anti-feromagnetik adalah nilai suseptibilitas merupakan fungsi dari temperatur. Apabila temperatur dinaikkan dari 0 K, efektivitas interaksi yang menimbulkan pengarah spin anti-paralel akan berkurang.

Ciri karakteristik serupa terdapat di kurva tahanan akibat hamburan yang ditimbulkan oleh ketidakaturan spin. Akan tetapi, teknik difraksi neutron adalah metode langsung untuk mempelajari struktur antiferomagnetik, selain menentukan momen magnetik berkaitan dengan ion logam. Pada beberapa atom magnetik tertentu terjadi hamburan magnetik neutron, dan karena amplitudo hamburan dari atom paralel dan atom antiferomagnetik berbeda, ada kemungkinan terjadi garis superkisi pada keadaan antiferomagnetik. Sebagai contoh, pada oksida mangan MnO , parameter sel satuan magnetik adalah 0,885 nm, sedangkan sel satuan kimia (struktur NaCl) hanya setengah dari nilai ini, yaitu 0,443 nm. Susunan atom ini analog dengan struktur paduan tertata dan tampak keberadaan garis superkisi magnetik di bawah titik Neel (122 K). Beberapa bahan magnetik mempunyai sifat diantara sifat antiferomagnetik dan sifat feromagnetik. Hal ini terjadi apabila momen dalam satu arah tidak sama

dengan momen dalam arah lain, sebagai contoh dalam magnetic, Fe_3O_4 , di mana ion ferous dan ion ferit dari senyawa $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ masing-masing menempati lokasi khusus tersendiri. Neel menyebut keadaan ini sebagai ferimagnetisme (ferrimagnetism) dan bahan terkait disebut ferit. Bahan jenis ini penting untuk bidang rekayasa listrik karena bersifat feromagnetik tanpa memiliki konduktivitas yang berarti; sehingga gangguan arus-eddy pada transformator tidak terlalu besar. Bahan ferit stronsium digunakan secara luas pada motor listrik misalnya, karena bahan memiliki sifat tersebut dan murah harganya.

2. Diamagnetik, Paramagnetik, Feromagnetik, Ferimagnetik dan Antiferomagnetik.

Diamagnetik adalah zat yang menunjukkan magnet negatif. Teori klasik (nonkuantum-mekanis) dari efek ini adalah seperti yang pertama kali dikerjakan oleh fisikawan Prancis Paul Langevin (1872–1946) dalam sebuah makalah terkenal yang diterbitkan pada tahun 1905 dimana dia menyempurnakan dan membuat beberapa ide kuantitatif dari teori yang sebelumnya telah dikemukakan oleh Ampere dan fisikawan Jerman Wilhelm Weber (1804-1891). Teori ini menganggap bahwa efek medan yang diterapkan pada orbit elektron tunggal adalah bertujuan untuk mengurangi arus efektif orbit, sehingga menghasilkan momen magnet yang berlawanan pada bidang yang diterapkan. Efek ini dijumlahkan atas semua elektron dalam atom, dan setiap atom dianggap bertindak secara independen dari yang lain.

Paramagnetik merupakan pengukuran sistematis pertama dari kerentanan sejumlah besar zat yang berada diatas rentang suhu yang diperpanjang, teori ini dibuat oleh Pierre Curie dan dilaporkan pada tahun 1895. Pierre Curie menemukan bahwa kerentanan massa X_m tidak tergantung pada suhu untuk diamagnetik, tetapi itu berbanding terbalik dengan suhu absolut untuk paramagnetik. Rumus perhitungan teori paramagnetik adalah:

$$X_m = C/T \quad (10.1)$$

Rumus tersebut disebut hukum Curie, dan C adalah konstanta Curie per gram. Rumus tersebut nantinya akan menunjukkan bahwa hukum Curie hanyalah kasus khusus dari rumus yang lebih umum.

$$X_m = C/(T - \Theta) \quad (10.2)$$

Rumus 10.2 disebut hukum Curie-Weiss. Dalam rumus tersebut Θ adalah konstanta, dengan dimensi suhu untuk salah satu zat dan sama dengan nol untuk zat-zat yang mematuhi hukum Curie.

Bahan ferromagnetik memiliki momen magnet permanen tanpa adanya medan eksternal dan menunjukkan magnetisasi permanen yang sangat besar. Magnetisasi spontan tidak tampak pada bahan yang tidak terkena medan luar, karena adanya domain pada bahan yang masing-masing memiliki arah magnetisasinya sendiri. Ketika medan diterapkan, domain dimana magnetisasi lebih hampir sejajar dengan medan tumbuh serta mengorbankan domain dengan potensi yang kurang menguntungkan. Karena magnetisasi spontan mungkin beberapa kali lipat lebih besar dari medan yang diterapkan, bahan ferromagnetik memiliki permeabilitas yang sangat tinggi, misalnya setinggi 10^6 . Untuk bahan ferromagnetik banyak digunakan dalam berbagai kebutuhan seperti sensor, aktuator, motor atau transformator. Properti utama ferromagnetik yang menarik adalah kemampuan ferromagnetik untuk mencapai tingkat magnetisasi yang tinggi ketika mengalami medan magnet eksternal dengan intensitas yang relatif rendah. Kemampuan tersebut berasal dari struktur mikro domain magnetik kompleks dan evolusinya dibawah penerapan pembebanan eksternal. Dalam pengertian tersebut, perilaku magnetik adalah contoh yang sangat baik dari fenomena multiskala dan eksperimen alami untuk pendekatan pemodelan multiskala.

Bahan ferimagnetik adalah jenis magnet permanen yang terjadi pada padatan dimana medan magnet yang terkait dengan atom individu secara spontan menyelaraskan diri dalam beberapa paralel atau dalam arah yang sama (seperti dalam feromagnetisme), dan umumnya seperti antiparalel, atau berpasangan dalam arah yang berlawanan (seperti dalam antiferromagnetisme). Perilaku magnetik kristal tunggal bahan ferimagnetik dapat dikaitkan dengan keselarasan paralel, efek pencairan atom-atom tersebut dalam susunan antiparalel membuat kekuatan magnet bahan-bahan ini umumnya lebih kecil daripada padatan feromagnetik murni seperti besi metalik.

Ferimagnetik terjadi terutama pada oksida magnetik yang dikenal sebagai ferit. Sifat magnet alami yang ditunjukkan oleh batu lode, tercatat sejak abad ke-6 SM, adalah magnetit ferit, mineral magnetit, senyawa yang mengandung ion oksigen negatif O^{2-} dan ion besi positif dalam dua keadaan, ion besi (II), Fe^{2+} dan

ion besi(III), Fe^{3+} . Ion oksigen tidak bersifat magnetis, tetapi kedua ion besi bersifat magnetis. Dalam kristal magnetit, yang diformulasikan secara kimia sebagai Fe_3O_4 , untuk setiap empat ion oksigen, terdapat dua ion besi (III) dan satu ion besi (II). Ion besi (III) dipasangkan dalam arah yang berlawanan, tidak menghasilkan medan magnet eksternal, tetapi ion besi (II) semuanya sejajar dalam arah yang sama, yang menyebabkan magnetisme eksternal. Penderetan spontan yang menghasilkan ferimagnetik akan sepenuhnya terjadi di atas suhu yang disebut titik Curie dan karakteristik masing-masing bahan ferimagnetik. Ketika suhu material berada di bawah titik Curie, maka ferimagnetik akan aktif kembali.

Antiferomagnetik adalah jenis magnetisme dalam padatan seperti mangan oksida (MnO) di mana ion-ion yang berdekatan yang berperilaku sebagai magnet kecil (dalam hal ini ion mangan, Mn^{2+}) secara spontan akan menyelaraskan diri pada suhu yang relatif rendah menjadi berlawanan atau antiparalel, penyesuaian terjadi pada seluruh bahan sehingga akan menunjukkan bahwa hampir tidak ada magnet eksternal yang kasar. Dalam bahan antiferomagnetik, meliputi logam dan paduan tertentu selain beberapa padatan ionik, magnetisme dari atom atau ion magnetik yang berorientasi dalam satu arah yang dibatalkan oleh kumpulan atom atau ion magnetik yang sejajar dalam arah sebaliknya.

Magnet antiparalel spontan ini tergantung oleh pemanasan dan dapat menghilang seluruhnya saat berada dalam posisi di atas suhu tertentu yang disebut suhu Néel. Beberapa bahan antiferomagnetik memiliki suhu Néel pada kisaran beberapa atau bahkan beberapa ratus derajat di atas suhu kamar, akan tetapi biasanya suhu ini bisa juga lebih rendah. Suhu Néel untuk mangan oksida misalnya seperti 122 K (-151°C atau 240°F).

Padatan antiferomagnetik menunjukkan perilaku khusus dalam medan magnet yang diterapkan dan tergantung pada suhu. Pada suhu yang sangat rendah padatan tidak menunjukkan respons terhadap medan eksternal karena penggunaan antiparalel magnet atom dipertahankan secara konsisten. Pada suhu yang lebih tinggi beberapa atom terlepas dari susunan yang teratur dan sejajar dengan medan luar. Di atas suhu Néel agitasi termal secara progresif mencegah penyelarasan atom dengan medan magnet sehingga magnet melemah dan magnet yang dihasilkan dalam padatan atomnya akan terus menurun seiring dengan peningkatan suhu.

3. Bahan Magnet Permanen

Tujuan dari magnet permanen adalah untuk memberikan medan magnet dalam volume tertentu. Medan magnet dapat dihasilkan oleh arus dalam konduktor atau oleh kutub dalam magnet. Untuk beberapa pengaplikasian, magnet permanen adalah pilihan yang lebih baik, karena memberikan medan yang konstan tanpa harus mengeluarkan daya listrik yang terus menerus. Magnet dapat dianggap sebagai perangkat penyimpan energi, energi ini dimasukkan ke dalamnya ketika pertama kali dimagnetisasi dan tetap berada di dalam magnet. Singkatnya, magnet memiliki sifat permanen dan selain itu energi magnet (terutama merupakan energi medan luarnya) selalu tersedia untuk digunakan dan tidak terkuras oleh penggunaan berulang-ulang seperti energi baterai.

Sebelumnya selama berabad-abad contoh benda yang digunakan untuk magnet permanen adalah jarum kompas jarum magnet. Saat ini penggunaan magnet permanen sudah merambah bidang industri dan rumah tangga mulai dari material di dalam mobil sampai di luar angkasa. Magnet dapat juga digunakan untuk pengeras suara juga memiliki pangsa pasar karena penggunaannya yang meluas dari radio, televisi dan *sound system*. Pasar besar bahan magnet lainnya ada di sepeda motor, digunakan untuk berbagai keperluan mobil, kipas, pendingin dan pemanas udara, kursi, dll. Magnet juga dipergunakan dalam beberapa perangkat teknologi seperti komputer, printer, pemindai dan perangkat sejenis dimana magnet yang digunakan adalah magnet yang berukuran kecil mempunyai kualitas yang baik. Bahan magnet juga dapat dipergunakan untuk berbagai terapi medis magnetik.

Semua bahan magnet permanen yang ada di dunia saat ini terbuat dari lima jenis bahan yang masing-masing memiliki karakteristik yang sangat berbeda. Lima jenis tersebut adalah alnico, ferit, magnet tanah jarang, samarium kobalt dan neodmium. Baca terus untuk mengetahui tentang setiap bahan baku, bagaimana jenis magnet permanen dibuat dan sifat magnet masing-masing.

a. Alnico

Istilah alnico adalah akronim dari aluminium, nikel dan kobalt, tiga elemen utama yang digunakan untuk membuat bahan magnetik alnico. Meskipun menjadi magnet permanen pertama yang dikembangkan pada tahun 1920-an, selain magnet tanah jarang, magnet alnico adalah magnet permanen terkuat yang tersedia. Pengenalan magnet alnico berarti bahwa elektromagnet mahal

dapat diganti dengan magnet permanen di perangkat seperti motor, generator dan pengeras suara.

Magnet Alnico telah diproduksi selama hampir 100 tahun dan selama ini prosesnya tidak berubah secara drastis. Elemen utama yang digunakan untuk membuat magnet alnico adalah aluminium, nikel dan kobalt, namun, seperti jenis magnet permanen lainnya, jejak elemen lain ditambahkan untuk menghasilkan karakteristik tertentu. Magnet Alnico diproduksi menggunakan salah satu dari dua metode:

1) Pengecoran

Jumlah elemen yang digunakan untuk membuat magnet alnico dimasukkan ke dalam tungku induksi dan dilebur pada suhu lebih dari 1750°C , bahan cair kemudian dituangkan ke dalam cetakan cangkang atau cetakan pasir yang lebih besar. Saat logam cair mendingin, cetakan cangkang mulai terbakar dan pada saat magnet dingin maka cangkang akan menjadi hampir hancur. Pola pencetakan memiliki ukuran yang mirip dengan ukuran magnet yang diperlukan tetapi dengan kelonggaran tambahan untuk penyusutan dan pemesinan sesuai ukuran. Rongga magnet di dalamnya dihubungkan oleh *runner* yang memungkinkan logam cair mencapai setiap rongga magnet dan *runner* kemudian dibuang dan dicairkan kembali setelah magnet dilemparkan. Magnet yang baru dilemparkan kemudian dikeluarkan dari cetakan sebelum dijepit pada roda gerinda untuk melepaskan *runner*. Magnet kemudian dipanaskan hingga suhu yang sangat tinggi dan kemudian ditempatkan ke dalam magnetiser sehingga dapat mulai mendingin saat berada di hadapan medan magnet yang sangat kuat. Magnet kemudian ditempatkan dalam oven tempering besar selama beberapa hari untuk meredam dan menstabilkan magnet. Tahap perlakuan panas dari proses dalam hubungannya dengan campuran paduan memberikan bahan magnetik karakteristik penanganan suhu dan sifat magnetik akhir. Terakhir magnet dimasukkan ke dalam kumparan atau magnetiser solenoida dan dalam seperlima detik, listrik menghasilkan medan yang diperlukan untuk memagnetisasi magnet sepenuhnya.

2) Sintering

Sebelum magnet alnico yang disinter dapat diproduksi, elemen mentah harus terlebih dahulu digiling halus dengan menggiling menjadi partikel

kecil. Bahan magnetik bubuk kemudian ditekan di bawah tekanan dengan bobot penekan berton-ton dalam cetakan, yang sangat mirip dengan bentuk akhir yang diinginkan. Setelah bubuk telah ditekan, bahan disinter dalam tungku dalam atmosfer hidrogen di lebih dari 1200°C . Proses ini menggabungkan semua partikel yang ditekan bersama untuk membentuk satu magnet. Bahan merah panas kemudian didinginkan dengan adanya medan magnet luar untuk membuat magnet anisotropik atau tanpa medan magnet luar untuk menghasilkan magnet isotropik. Umumnya, magnet alnico yang disinter tidak memerlukan pembentukan atau pemesinan lebih lanjut karena cetakan yang ditekan dibuat sangat dekat dengan bentuk magnet yang diinginkan. Terakhir bahan magnet mentah dimagnetisasi dengan menempatkannya di dalam kumparan atau magnetiser solenoida untuk memagnetisasi magnet.

Magnet Alnico digunakan dalam aplikasi yang memerlukan stabilitas magnet luar biasa saat beroperasi pada suhu tinggi karena magnet ini kehilangan lebih sedikit kekuatan magnet per kenaikan suhu dibandingkan magnet permanen lainnya. Magnet ini memiliki suhu operasi maksimum tertinggi dari bahan magnet permanen, bahkan hingga 550°C untuk beberapa kelas. Namun, terlepas dari ketahanannya terhadap suhu tinggi, magnet ini rentan terhadap demagnetisasi yang sedemikian rupa sehingga memaksa dua magnet alnico yang ditempatkan bersama-sama berada dalam tolakan dan dapat secara permanen mendemagnetisasi keduanya.

b. Ferit

Ferit adalah istilah yang digunakan untuk merujuk pada besi murni, bahan feromagnetik yang paling mudah dikenali. Hal tersebut juga merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan bahan magnet ferit yang merupakan senyawa yang terdiri dari strontium karbonat atau barium dan oksida besi (Fe_2O_3). Magnet ferit memiliki biaya produksi yang rendah tetapi juga jauh lebih lemah dibandingkan magnet samarium kobalt dan magnet neodmium. Karena biaya produksinya yang rendah, ferit adalah salah satu bahan magnetik yang paling banyak digunakan ketika kinerja magnetik tinggi bukanlah menjadi faktor yang paling penting.

Metode untuk memproduksi magnet ferit tidak semahal atau secanggih untuk membuat magnet tanah jarang dan karena sangat keras dan rapuh ferit umumnya diproduksi dalam bentuk dasar seperti kotak, silinder dan cincin.

Produksi magnet ferit dimulai dengan kalsinasi campuran serbuk halus oksida besi dan strontium karbonat untuk menghasilkan bahan oksida logam. Setelah didinginkan, serbuk yang sudah halus kemudian digiling beberapa kali untuk mereduksi bahan yang dikalsinasi menjadi partikel halus yang lebih kecil dari 2 mikrometer atau 2 mikron, sehingga setiap partikel terdiri dari satu domain magnetik tunggal. Bubuk tersebut kemudian ditekan dan dipadatkan menjadi cetakan. Jika penekanan terjadi di dalam medan magnet yang diterapkan secara eksternal, partikel magnet akan sejajar dan magnet yang dihasilkan akan menjadi anisotropik. Jika bubuk ditekan tanpa medan magnet yang diterapkan secara eksternal, magnet akan menjadi isotropik dan memiliki sifat magnet yang lebih lemah. Setelah ditekan, partikel yang dipadatkan kemudian disinter pada suhu yang sangat tinggi untuk membuat partikel menyatu sebelum akhirnya menjadi magnet.

Magnet ferit tidak mahal untuk diproduksi yang relatif berpengaruh terhadap kekuatan magnet keseluruhannya. Meskipun secara signifikan lebih lemah dari bahan tanah jarang ferit masih banyak digunakan dalam banyak aplikasi komersial. Kekuatan utama magnet ferit adalah ketahanannya terhadap demagnetisasi dan korosi.

c. Magnet Tanah Jarang

Untuk sepenuhnya memahami magnet tanah jarang, penting untuk memahami terbuat dari apa dan dari mana asalnya. Ada 17 unsur dalam tabel periodik yang termasuk dalam keluarga tanah jarang, lima belas unsur yang dikenal sebagai lantanida ditambah skandium dan itrium. Benih-benih teknologi ini masing-masing memainkan peran dalam pengembangan industri teknologi tinggi yang terus menerus. Mungkin mengejutkan apabila mengetahui bahwa sekurang-kurangnya ada delapan dari 17 elemen di ponsel merek iPhone yang termasuk neodymium, dysprosium dan praseodymium yang semuanya digunakan dalam paduan yang digunakan untuk membuat magnet tanah jarang bersama dengan elemen samarium. Magnet tanah jarang adalah magnet permanen terkuat yang tersedia dan memiliki kinerja yang jauh lebih tinggi daripada magnet ferit (keramik) dan alnico. Istilah 'tanah jarang' dapat menyesatkan karena logam tanah jarang relatif melimpah di kerak bumi. Namun, material ini jarang ditemukan dalam bentuk terkonsentrasi, melainkan biasanya tersebar dengan elemen lain.

Ada dua jenis magnet tanah jarang, magnet neodymium (NdFeb) dan magnet samarium kobalt (SmCo). Ada banyak nilai yang berbeda dari masing-masing, yang semuanya memiliki sifat yang berbeda. Magnet kobalt samarium adalah yang pertama ditemukan pada tahun 1966 oleh Dr. Karl J. Strnat dan terbuat dari paduan samarium, kobalt, besi, tembaga, hafnium, zirkonium, dan praseodymium. Sebelum ditemukannya magnet neodymium magnet ini adalah magnet terkuat yang tersedia, magnet ini sangat sulit untuk didemagnetisasi, memiliki suhu operasi maksimum yang tinggi dan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap korosi. Ketika magnet neodymium ditemukan pada tahun 1982 oleh General Motors dan Sumitomo Special Metals, magnet ini mengambil gelar magnet permanen terkuat yang ada, yang magnet ini pertahankan hingga hari ini. Magnet neodymium terbuat dari paduan yang terutama terdiri dari neodymium, besi dan boron dan tergantung pada tingkat magnet yang diproduksi, jumlah dysprosium dan praseodymium yang bervariasi. Nilai reguler neodymium memiliki suhu operasi maksimum yang lebih rendah daripada magnet samarium kobalt dan rentan terhadap korosi jika tidak dilapisi. Magnet tanah jarang digunakan ketika ruang berada pada tingkat premium atau tarikan magnet terbesar mungkin diperlukan. Meskipun sangat penting untuk banyak industri teknologi, manufaktur dan teknik, magnet ini juga populer untuk hobi, kerajinan dan karya seni lainnya karena kinerja dan keterjangkauannya.

d. Samarium Kobalt

Samarium kobalt (SmCo) adalah bahan magnetik yang terbuat dari paduan elemen tanah jarang samarium dan kobalt logam keras serta jejak besi, tembaga, hafnium, zirkonium dan praseodymium. Seperti neodymium, magnet samarium kobalt dikenal sebagai magnet tanah jarang karena samarium adalah bagian dari kelompok elemen tanah jarang yang sama dengan neodymium. Magnet kobalt samarium dikembangkan pada awal 1970-an oleh Laboratorium Bahan Angkutan Udara AS dan kemudian menjadi magnet terkuat yang tersedia sampai pengenalan magnet neodymium kira-kira sepuluh tahun kemudian. Pada saat diperkenalkan material ini revolusioner, tiga kali lipat kekuatan bahan magnet terkuat yang tersedia. Magnet kobalt samarium biasanya diproduksi dengan metode reduksi dan peleburan diikuti dengan proses pengikatan atau sintering bahan baku untuk

membentuk magnet. Sintering adalah metode manufaktur yang paling umum seperti yang dijelaskan sebelumnya.

Sama halnya dengan proses pembuatan magnet neodymium, bahan baku pembuatan magnet samarium kobalt dipanaskan dalam tungku induksi dan dilebur. Paduan cair kemudian dituangkan ke dalam cetakan dan didinginkan untuk membentuk ingot. Setelah ingot didinginkan, magnet ini dipecah dan digiling untuk menghasilkan partikel kecil bubuk samarium kobalt berukuran mikron. Bubuk kemudian ditekan menggunakan salah satu dari dua metode; die pressing, dimana serbuk ditaruh di hard die dan dipress atau isostatic pressing dimana serbuk diletakkan di rubber die dan dipress dengan tekanan yang sama ke segala arah. Magnet yang ditekan isostatik umumnya memiliki karakteristik magnet yang lebih baik sementara magnet yang ditekan mati dapat dibuat ke dimensi yang lebih kecil. Setelah bubuk ditekan kemudian disinter pada suhu hingga 1250°C , sehingga sekering bubuk menjadi padatan. Bahan yang disinter kemudian diberi perlakuan larutan pada suhu yang sama sebelum ditemper antara 700°C dan 900°C , dan kemudian didinginkan dengan adanya medan magnet yang diterapkan secara eksternal. Terakhir bahan magnetik dikerjakan, digiling dan diselesaikan menggunakan mesin gerinda berlapis berlian berpendingin air sebelum dilapisi dan dimagnetisasi. Magnet samarium kobalt tersedia dalam dua jenis atau grade, yang biasa disebut dengan seri 1:5 dan seri 2:17. Kedua seri memiliki kekuatan magnet yang tinggi dan memiliki produk energi maksimum hingga 35MGOe. Meskipun tidak sekuat magnet neodymium, kekuatan utama magnet ini adalah dapat mempertahankan kinerjanya pada suhu hingga 350°C . Magnet ini juga sangat tahan terhadap korosi, bahkan tanpa lapisan. Namun, karena mengandung kobalt, magnet ini relatif mahal untuk diproduksi.

e. Neodymium

Neodymium (Nd) adalah unsur tanah jarang dengan nomor atom 60 yang ditemukan pada tahun 1885 oleh kimiawan Austria Carl Auer von Welsbach. Meskipun bagian dari neodymium keluarga tanah jarang relatif melimpah dan tidak lebih langka dari tembaga. Neodymium dicampur dengan besi dan boron serta jejak elemen lain seperti dysprosium dan praseodymium untuk menghasilkan paduan feromagnetik yang dikenal sebagai Nd₂Fe₁₄B, bahan magnet terkuat di dunia. Dikembangkan pada tahun 1982 oleh General Motors

dan Sumitomo Special Metals, magnet neodymium telah menggantikan jenis bahan magnetik lainnya di banyak peralatan komersial dan industri modern. Sebelum neodymium dapat dibuat menjadi magnet neodymium, bijih mineral tanah jarang yang ditambang harus dimurnikan; prosedur yang melibatkan lusinan proses kimia. Setelah halus, neodymium dicampur dengan besi, boron dan elemen lain yang diperlukan untuk membuat kadar yang diinginkan dengan memanaskannya dalam tungku induksi vakum sampai meleleh. Umumnya, paduan cair kemudian didinginkan untuk membentuk ingot sebelum digiling menjadi butiran kecil di pabrik jet. Serbuk super halus kemudian ditekan dalam cetakan sambil secara bersamaan terkena medan magnet besar yang dihasilkan oleh elektromagnet. Saat bahan bubuk ditekan, medan magnet menyelaraskan domain magnetik individu dari bahan feromagnetik ke arah medan magnet. Saat bahan ditekan, arahnya diatur dan bahan anisotropik diberikan arah magnetisme yang disukai. Arah magnetisme yang disukai ini berkontribusi pada kekuatan magnet akhir dan koersivitas tinggi. Jika tidak ada medan magnet eksternal yang diterapkan selama tahap proses ini, domain magnet individu material tidak akan semuanya disejajarkan secara seragam (isotropik) dan sebagai hasilnya, material dapat dimagnetisasi ke segala arah. Namun, magnet yang sudah jadi akan memiliki sebagian kecil dari kekuatan magnet anisotropik dan akan memiliki koersivitas yang lebih rendah.

Magnet neodymium adalah magnet terkuat yang tersedia dan karena itu memiliki rasio daya terhadap volume dan berat yang tinggi. Karena material ini sangat kuat, itu juga berarti material ini memiliki biaya per unit kekuatan yang relatif rendah (Produk Energi Maksimum, MGOe). Magnet ini memiliki ketahanan yang sangat tinggi terhadap demagnetisasi tetapi umumnya memiliki suhu operasi maksimum yang rendah dibandingkan dengan bahan lain dan rentan terhadap korosi jika lapisannya rusak. Nilai lain dari magnet neodymium, termasuk nilai suhu operasi maksimum tinggi khusus yang tersedia.

C. Latihan Soal

1. Tentukan kelompok bahan magnetik untuk troilite, pyrite, biotite dan siderite.
2. Jelaskan dengan baik perbedaan sifat kemagnetan untuk bahan
 - a. Diamagnetik,
 - b. Paramagnetik,
 - c. Feromagnetik,
 - d. Ferimagnetik, dan
 - e. Antiferomagnetik.

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai& Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 11

KARAKTERISTIK KELISTRIKAN BAHAN MAGNETIK

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu menjelaskan karakteristik kelistrikan bahan magnetik.

B. Uraian Materi

1. Bahan Magnetik

Besarnya medan induksi yang terjadi dalam logam apabila logam tersebut ditempatkan dalam medan magnetik yang berkekuatan H , maka dapat dituliskan sebagai,

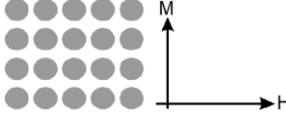
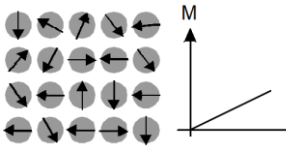
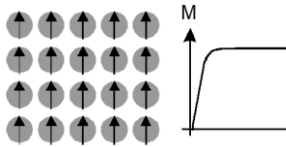
$$B = \mu_0 (H + M) \quad (11.1)$$

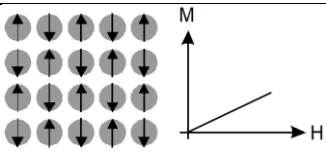
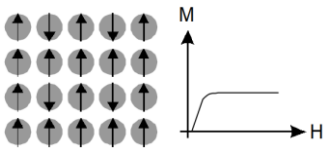
Dimana B merupakan densitas fluks magnetik atau induksi magnetik. Kuantitas M menunjukkan magnetisasi bahan. Magnetisasi M didefinisikan sebagai jumlah momen dipol magnetik per unit volum bahan. Total medan magnetik di dalam bahan paramagnetik atau feromagnetik bergantung pada medan luar yang diberikan dan magnetisasinya. Parameter H dan M memiliki satuan yang sama yaitu dalam A/m . Nilai H hanya bergantung pada kekuatan medan magnet eksternal. Pada material yang besar hubungan antara M dengan H dengan asumsi bahan bersifat isotropik dituliskan sebagai,

$$M = \chi_m H \quad (11.2)$$

Dimana χ_m adalah suseptibilitas magnetik. Bila nilai ini positif maka bahan memiliki karakteristik paramagnetik dan medan magnetik akan diperkuat keberadaannya dalam bahan. Namun bila bernilai negatif maka bahan memiliki karakteristik diamagnetik dan medan magnetik akan diperlemah keberadaannya dalam bahan. Secara ringkas dari sifat kemagnetan dalam bahan dirangkum seperti pada tabel 11.1 dan karakteristik dari beberapa bahan magnetik kuat dituangkan pada Tabel 11.2.

Tabel 11.1. Perilaku Magnetik pada Bahan dengan Sifat Kemagnetan yang Berbeda.

Sifat kemagnetan	Suseptibilitas	Perilaku magnetik	Bahan dan nilai suseptibilitas	
Diamagnetik	Rendah dan bernilai negatif	Atom tidak memiliki momen magnetik. 	Au	$-2,74 \times 10^{-6}$
			Cu	$-0,77 \times 10^{-6}$
Paramagnetik	Rendah dan bernilai positif	Atom memiliki momen magnetik yang orientasinya acak. 	B-Sn	$0,19 \times 10^{-6}$
			Pt	$21,04 \times 10^{-6}$
			Mn	$66,10 \times 10^{-6}$
Feromagnetik	Besar dan bernilai positif, merupakan fungsi dari medan yang diberikan dan dipengaruhi mikrostruktur	Atom memiliki momen magnetik yang terarah secara paralel. 	Fe	~ 100000
Anti-feromagnetik	Rendah dan bernilai positif	Atom memiliki momen magnetik yang terarah secara paralel dan anti paralel.	Cr	$3,6 \times 10^{-6}$

				
Ferimagnetik	Besar dan bernilai positif, merupakan fungsi dari medan yang diberikan dan dipengaruhi mikrostruktur	Atom memiliki momen magnetik yang terarah secara anti paralel. 	Ba ferrite	~3

Tabel 11.2. Karakteristik dari Bahan Magnetik Kuat.

No	Bahan	B_r , Wb/m ²	H_c , kA/m	$B_r H_c$, kJ/m ³
1	Baja karbon tinggi (martensit)	0,90	3,98	3,58
2	Baja tungsten (5% W)	1,05	5,57	5,85
3	Baja krom (4% Cr)	0,95	5,17	4,91
4	Baja kobalt (36% Co)	0,95	18,31	17,40
5	Paduan Al-Ni-Co	0,8-1,2	60-120	48-144
6	Feritik barium	0,21	140	29,4
7	Kobalt tanah jarang -Co5(Sm,Pr)	1,0	200	200

Magnetisasi pada bahan padat merupakan penjumlahan momen magnetik dalam satuan volum-nya.

Magnetisasi = momen magnetik/volum

$$= A \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$= \text{A/m}$$

Contoh soal:

Saturasi magnetik pada besi yang memiliki struktur kristal kubik BCC sebesar 1750 kA/m. Tentukan jumlah momen magnetik per atom Fe dalam struktur kristal tersebut.

Diketahui:

Parameter kisi struktur kristal kubik BCC dari Fe	= 2,87 Å
Volum unit sel (parameter kisi ³)	= $2,87^3 \times 10^{-30} \text{ m}^3$
Jumlah atom struktur kristal kubik BCC	= 2

Jawaban:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah momen magnetik per atom} &= 1750 \times 1000 \times 2,87^3 \times 10^{-30} \times 1/2 \\ &= 2,068 \times 10^{-23} \text{ A.m}^2 \end{aligned}$$

Dalam satuan μ_B (Bohr magneton) nilai momennya adalah

$$\begin{aligned} &= 2,068 \times 10^{-23} / (9,273 \times 10^{-24}) \\ &= 2,2 \end{aligned}$$

2. Bahan Magnet dan Sifat Listrik

Pembahasan ini terdiri dari fenomena fisik yang melibatkan medan magnet dan pengaruhnya terhadap bahan. Medan magnet dapat diatur pada skala makroskopik oleh arus listrik atau magnet. Pada skala atom, atom individu menyebabkan medan magnet ketika elektron mereka memiliki momen magnet bersih sebagai akibat dari momentum sudut. Momen magnet muncul setiap kali partikel bermuatan memiliki momentum sudut. Medan magnet adalah efek kooperatif dari momen magnet atom yang menyebabkan medan magnet makroskopik magnet permanen. Namun, prinsip dan mekanisme yang mendasari serta menjelaskan fenomena magnetik itu kompleks dan halus. Beberapa perangkat teknologi modern mengandalkan magnet dan bahan magnetik seperti termasuk motor listrik, generator dan transformator tenaga listrik, komponen reproduksi suara dan video sistem, telepon, radio, televisi,

komputer, dll. Contoh bahan magnetik yang terkenal yang menunjukkan sifat magnetik adalah besi, beberapa baja dan batu permata mineral yang terjadi secara alami. Fakta penting tentang bahan magnetik adalah:

- Ada beberapa bahan yang menunjukkan sifat magnetik bahkan tanpa aplikasi apapun medan magnet dan menjadi lebih magnetis ketika medan magnet lemah diterapkan padanya.
- Ada banyak bahan lain yang kehilangan kemagnetan awalnya yang kuat ketika dipanaskan di atas suhu kritis tertentu dan menjadi magnet yang relatif lemah.
- Ada beberapa bahan yang menunjukkan respons magnetik dalam arah yang berlawanan dengan arah manapun bidang yang diterapkan secara eksternal.
- Bahan magnetik adalah semua media yang mampu dimagnetisasi dalam medan magnet, yaitu menciptakan medan magnet sendiri. Menurut sifat magnetiknya, bahan tersebut dibagi menjadi tiga kelompok utama bahan diamagnetik, paramagnetik dan feromagnetik. Dari aplikasi sudut pandang semua bahan magnetik dapat ditempatkan di bawah dua kelompok yaitu bahan magnetik lunak dan keras.

Besi, beberapa baja, dan batu permata mineral yang terbentuk secara alami adalah contoh material yang terkenal yang menunjukkan kemagnetan. Bahan ferro dan ferrimagnetik adalah bahan magnetik terpenting dari sudut pandang aplikasi praktis. Kami pertama-tama akan mempertimbangkan istilah dan definisi yang digunakan dalam magnetisme.

Induksi Magnetik atau densitas fluks magnetik (B) dengan adanya medan magnet dalam ruang hampa, induksi magnetik (B) terkait dengan kekuatan medan H (dalam satuan $A - m^{-1}$) sebagai berikut:

$$B = \mu_0 H \quad (11.3)$$

Dimana μ_0 disebut permeabilitas ruang bebas. B dinyatakan dalam satuan tesla atau Weber per meter persegi. Satuan permeabilitas adalah

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \frac{B}{H} = \frac{Wb - m^2}{A - m^{-1}} & (Wb - m^2 = NA^{-1}m^{-1}) \\ &= H - m^{-1} \quad (H = Wb - A^1 \text{ dimana } H \text{ adalah Henry}) \end{aligned} \quad (11.4)$$

Dalam satuan SI, permeabilitas ruang bebas (μ_0) memiliki nilai $4\pi \times 10^{-7} H - m^{-1}$.

Medan Magnet (H) dikatakan menempati suatu daerah apabila pengaruh magnetis dari arus listrik atau magnet di atas magnet uji kecil yang dibawa disekitarnya dapat dideteksi. Kekuatan medan magnet dilambangkan dengan H . Ketika bahan magnetik ditempatkan dalam medan magnet H , itu menjadi magnet. Kuat medan magnet (H) dinyatakan dalam satuan $A\cdot m^{-1}$. Jika medan magnet diterapkan pada media padat, induksi magnetik dalam padatan diberikan oleh hubungan

$$B = \mu H \quad (11.5)$$

Dimana μ adalah permeabilitas bahan padat yang dilalui oleh garis gaya magnet. Secara umum tidak sama dengan μ_0 . Rasio μ/μ_0 adalah permeabilitas relatif media dan ditunjuk oleh μ_r . Secara matematis

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (11.6)$$

Magnetisasi ini dapat didefinisikan sebagai proses mengubah batang non-magnetik menjadi magnet batang. Istilah ini hampir sejalan dengan polarisasi dalam bahan dielektrik. Kerapatan fluks

$$\begin{aligned} B &= \mu H = \mu_0 \mu_r \mu H \\ &= \mu_0 \mu_r \mu H + \mu_0 H - \mu_0 H \\ &= \mu_0 H + \mu_0 H (\mu_r - 1) \end{aligned} \quad (11.7)$$

$$\begin{aligned} &= \mu_0 H + \mu_0 M \\ &= \mu_0 (H + M) \end{aligned} \quad (11.8)$$

Dimana $M = \mu_0 (H + M)$ disebut magnetisasi padatan dan dinyatakan dalam ampere/meter. Dari hubungan diatas, ditemukan bahwa jika medan magnet diterapkan pada material, kerapatan fluks magnet sama dengan efek pada vakum dan material. Magnetisasi (M) dengan demikian dapat didefinisikan sebagai dipol magnet momen per satuan volume batang.

Suseptibilitas Magnetik (χ) besarnya magnetisasi, M sebanding dengan medan yang diterapkan sebagai berikut:

$$M = \chi H \quad (11.9)$$

Dimana (χ) disebut suseptibilitas magnetik, yang tidak memiliki unit. Suseptibilitas magnetik dan relatif permeabilitas terkait sebagai berikut:

$$\chi = \mu_r - 1 = M/H \quad (11.10)$$

Dapat dicatat bahwa B, M dan H adalah vektor. Unit magnetik dan faktor konversi untuk SI dan CGS – emu sistem dapat dilihat pada Tabel 11.3. Dapat dicatat bahwa unit magnetik dapat menjadi sumber kebingungan karena sebenarnya ada dua sistem yang umum digunakan. Sistem yang digunakan sejauh ini adalah SI [MKS yang dirasionalisasi (meterkilogram-detik)]; sistem yang lainnya berasal dari CGS-emu (unit elektromagnetik sentimeter-gram-detik).

Tabel 11.3. Unit Magnetik dan Faktor Konversi untuk SI, CGS dan Emu Sistem

Kuantitas	Simbol	Unit SI		CGS Emu Unit	Konversi
		Derived	Primary		
Magnetic induction (flux density)	B	tesla (Wb/m ²)	Kg/s-C	gauss	$= 1 \frac{Wb}{m^2}$ $= 10^4$ gauss
Magnetic field strenght	H	$\frac{amp - turn}{m}$	C/m-s	oersted	$\frac{1amp - turn}{n}$ $= 4\pi \times 10^{-3}$ oersted
Magnetization	M (SI)	$\frac{amp - turn}{m}$	C/m-s	maxwell /cm ²	$\frac{1amp - turn}{m}$ $= 10^{-3}$ maxwell /cm ²
Permeability of a vacuum	μ_0	henry/m	kg-m/C ²	unitless	$4\pi \times 10^{-7}$ henry/m = 1 emu
Relative permeability	μ_r (SI) μ' (CGS-emu)	unitless	unitless	unitless	$\mu_r = \mu'$
Susceptibility	χ (SI) χ' (CGS-emu)	Unitless	unitless	unitless	$\chi = 4\pi\chi'$

Dipol magnet adalah kemagnetan bersifat dipolar, yaitu magnetisme yang ditandai dengan memiliki dua kutub yang berlawanan utara (N) dan selatan (S). Dipol magnetik ditemukan ada dalam bahan magnetik, yang dalam beberapa hal analog dengan dipol listrik. Kekuatan dipol magnet diukur dengan produk dari kutub kekuatan dan jarak antar kutub. Ini disebut momen magnetik. Dipol magnet dipengaruhi oleh medan magnet dan di dalam medan magnet, gaya medan itu sendiri memberikan torsi yang cenderung untuk mengarahkan dipol dengan medan magnet. Salah satu sumber kemagnetan dalam atom adalah gerak orbital elektron. Setiap elektron yang berputar di sekitar nukleus dalam atom membentuk muatan listrik yang bersirkulasi atau arus dan dengan demikian menghasilkan medan magnet kecil. Selain itu, setiap elektron yang berputar pada porosnya juga dapat dipahami sebagai muatan yang bersirkulasi dan juga menghasilkan medan magnet kecil. Berkali-kali itu nyaman untuk memikirkan gaya magnet dalam hal medan. Garis gaya imajiner dapat ditarik untuk menunjukkan arah gaya pada posisi di sekitar sumber medan.

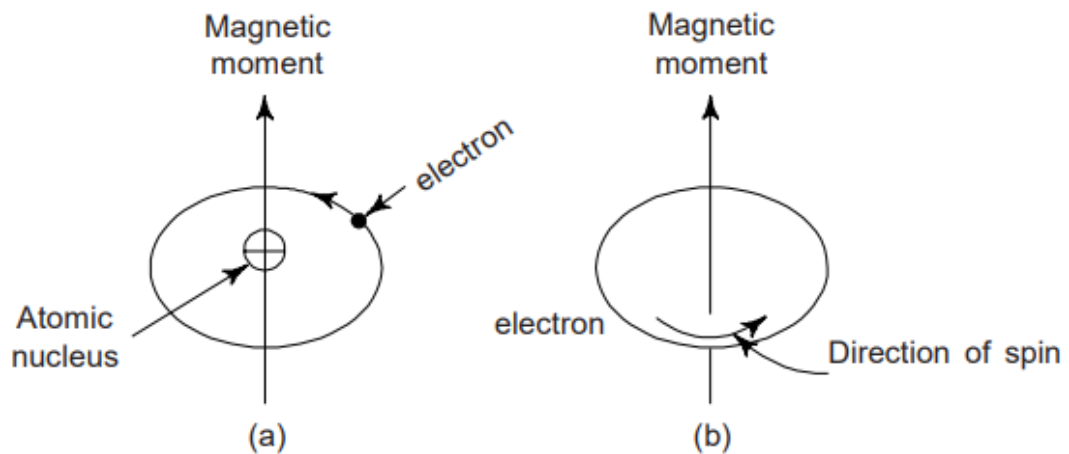
3. Asal Mula Momen Magnet

Sifat magnetik makroskopik suatu zat adalah konsekuensi dari momen magnetik yang terkait dengan elektron individu. Setiap elektron dalam atom memiliki momen magnetik yang berasal dari dua sumber:

- a. Momen magnetik orbital elektron
- b. Momen magnetik spin elektron

Perlu dicatat bahwa momen magnet permanen juga dapat muncul dari momen magnet spin dari inti. Dari ketiganya, momen spin dipol elektron penting dalam sebagian besar bahan magnetik. Magnetik momen yang terkait dengan elektron yang mengorbit dan elektron yang berputar ditunjukkan pada Gambar 11.1. Elektron dalam sebuah atom terus mengorbit di sekitar nukleus; menjadi muatan yang bergerak, sebuah elektron dapat dianggap sebagai loop arus kecil, menghasilkan medan magnet yang sangat kecil, dan memiliki magnet momen sepanjang sumbu rotasinya. Selain itu, setiap elektron juga dapat dianggap berputar di sekitar sumbu; momen magnetik lainnya berasal dari putaran elektron ini yang diarahkan sepanjang sumbu putaran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.1. Perlu dicatat bahwa momen magnetik spin mungkin hanya dalam arah naik atau dalam arah turun antiparalel. Jelas setiap elektron dalam atom mungkin dianggap sebagai magnet kecil yang memiliki orbital permanen dan

momen magnet berputar. Magnet bersih momen akibat spin elektron dalam atom natrium adalah satu unit, yang disebut magneton Bohr μ_B , yang besarnya $9,27 \cdot 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$. Untuk setiap elektron dalam atom momen magnet spin adalah $\pm \mu_B$ (+ tanda untuk berputar ke atas dan – tanda untuk berputar ke bawah). Kontribusi momen magnetik orbital sama dengan $m_l \mu_B$, m_l menjadi bilangan kuantum magnetik elektron.



Gambar 11.1 Elektron yang Mengorbit dan Elektron yang Berputar

Sifat magnetik suatu bahan berasal dari ketidakseimbangan orientasi spin dalam atom. Sebuah angka atom atau molekul memiliki elektron berpasangan dan tidak berpasangan. Perlu dicatat bahwa ada satu elektron dalam s-shell terluar yang tidak berpasangan dan menyelaraskan diri dalam medan terapan, yang menimbulkan magnetisme. Ini mengungkapkan bahwa momen magnetik atom dalam keadaan padat hanya disebabkan oleh kulit bagian dalam yang tidak lengkap. Menarik untuk dicatat bahwa elektron dalam kulit terdalam yang tidak lengkap dari elemen transisi memiliki spinnya sejajar dalam arah yang sama, atau dapat dikatakan bahwa elektron mengatur diri mereka sendiri di antara tingkat energi untuk memberikan momentum sudut putaran total maksimum yang mungkin. Ini cukup konsisten dengan pengecualian Pauli prinsip. Dengan demikian momen magnetik bersih, maka untuk sebuah atom hanyalah jumlah dari momen magnetik masing-masing elektron penyusunnya, termasuk kontribusi orbital dan spin, dan dengan mempertimbangkan momen pembatalan. Untuk atom yang memiliki kulit atau subkulit elektron yang terisi penuh, ketika semua elektron dipertimbangkan, ada pembatalan total momen orbital dan spin. Inilah mengapa bahan-bahannya tersusun atom yang memiliki kulit elektron yang

terisi penuh tidak dapat dimagnetisasi secara permanen. Jenis bahan ini termasuk gas inert. (Dia, Ne, Ar, dll.) serta beberapa bahan ionik. Seseorang dapat memperoleh momen atom dari elemen transisi ke-3 dalam keadaan padat dengan menambahkan spin momen magnetik elektron dikulit yang tidak terisi.

a. Teori Weiss

Teori medan molekuler feromagnetik Weiss merupakan upaya realistis pertama untuk menjelaskan sifat-sifat feromagnet. Teori ini bertumpu pada dua hipotesis yaitu:

- 1) Dibawah titik Curie, zat feromagnetik terdiri dari partikel kecil yang termagnetisasi secara spontan pada wilayah yang disebut domain. Momen magnet total bahan adalah jumlah vektor gaya magnet momen dari masing-masing domain. Sekarang diketahui bahwa domain yang diasumsikan ini benar-benar ada dan biasanya berukuran 0,1 dan 0,01 cm.
- 2) Setiap domain termagnetisasi secara spontan karena medan molekuler (magnetik) yang kuat cenderung sejajar momen magnetik atom individu dalam domain.

Konsekuensi dari asumsi ini adalah bahwa, sementara setiap domain termagnetisasi secara spontan, arah magnetisasi domain tidak bertepatan; oleh karena itu magnetisasi keseluruhan dari sampel mungkin jauh lebih kecil daripada jika terdiri dari satu domain. Penerapan yang relatif lemah medan ($\sim 100 - 1000$ Oersteds) dan (seringkali sangat sedikit) cukup untuk menyelaraskan arah magnetisasi domain, sehingga mencapai magnetisasi besar. Hipotesis kedua dari teori Weiss mengarah pada keberadaan suhu Curie yang dibawahnya sebuah domain dapat termagnetisasi secara spontan tanpa adanya medan magnet yang diterapkan. Berdasarkan teori, medan efektif yang bekerja pada setiap momen magnet atom dalam domain dapat ditulis sebagai,

$$H = H_0 + \lambda M$$

(11.11)

Dimana H_0 adalah medan magnet yang diterapkan secara eksternal dan λM (M = Magnetisasi) adalah medan molekuler Weiss yang urutan besarnya dalam Fe adalah 10^7 Oersted. Ada kesepakatan umum secara keseluruhan

antara teori dan hasil eksperimen ketergantungan suhu magnetisasi spontan untuk Fe, Ni dan Co. Perilaku suhu rendah, bagaimanapun, lebih baik dijelaskan oleh teori magnon. Teori ini secara memuaskan menggambarkan ketergantungan suhu dari kerentanan di wilayah paramagnetik asalkan suhunya jauh di atas suhu Curie. Suhu Curie ditentukan dari teori magnetisasi spontan berbeda beberapa derajat dari nilai yang ditentukan secara eksperimental untuk wilayah paramagnetik.

b. Teori Interaksi Pertukaran Heisenberg

Teori feromagnetik Heisenberg membahas asal usul medan molekuler Weiss berdasarkan atom. Dapat dikatakan bahwa interaksi dipol-dipol biasa antara momen magnetik atom jauh terlalu kecil untuk memperhitungkan bidang Weiss. Landasan teori Heisenberg adalah pengecualian prinsip Pauli. Karena interaksi pertukaran Heisenberg, dua putaran sekitar padatan digabungkan bersama dengan energi pertukaran yang diberikan oleh

$$E_{\text{exch}} = -2J \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j \quad (11.12)$$

Dimana $\mathbf{S}_i$ dan $\mathbf{S}_j$ adalah vektor momentum sudut spin dari dua elektron i dan j , dan J adalah apa yang disebut pertukaran integral antara dua elektron. Integral pertukaran berkurang dengan cepat dengan jarak antara elektron dan tergantung secara rumit pada distribusi spasial (fungsi gelombang) dari elektron. Hal ini sangat sulit untuk dihitung. Kekuatan J dapat diperkirakan dari suhu Curie T_c . Jika ada Z terdekat ke pusat i^{th} putaran.

c. Energi Anisotropi Kristal

Teori ini menjelaskan fakta eksperimental bahwa feromagnetik cenderung termagnetisasi disepanjang sumbu kristalografi tertentu, yang disebut arah magnetisasi mudah. Misalnya, kristal tunggal Fe, yang terdiri dari susunan kubik atom besi, cenderung termagnetisasi ke arah tepi kubus. Ini membutuhkan sekitar $1,4 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ (pada suhu ruangan) untuk memindahkan magnetisasi ke arah yang keras sepanjang diagonal badan kubik. Energi pertukaran Heisenberg, (Persamaan 11.12) isotropik dan tidak dapat menjelaskan anisotropi yang diamati, yang mungkin berasal dari interaksi rumit kopling spin-orbit, medan listrik kristal, dan tumpang tindih fungsi gelombang orbital. Energi anisotropi tergantung pada regangan kristal,

sehingga menimbulkan untuk magnetostriction, yaitu, perubahan panjang suatu zat ketika itu magnet.

C. Latihan Soal

1. Tentukan nilai saturasi magnetik dari magnetite yang memiliki struktur kubik dengan parameter kisi sebesar $8,37 \text{ \AA}$. Dalam satu unit sel tersebut terdapat 16 ion feritik dan 8 ion ferrous.
2. Bila diketahui saturasi dari magnetite sebesar 510 kA/m , tentukan saturasi dari nikel ferit yang memiliki struktur kristal yang sama dengan magnetite tersebut. (nomor atom Fe = 26 dan Ni = 28)

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 12

BAHAN SEMIKONDUKTOR

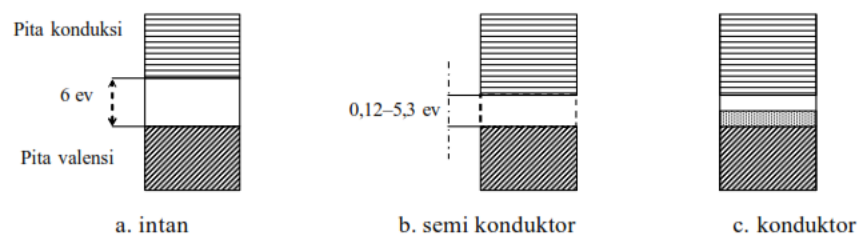
A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan jenis bahan semikonduktor. Mampu menjelaskan teknik pembentukan perangkat semikonduktor.

B. Uraian Materi

1. Bahan Semikonduktor

Bahan semikonduktor memegang peranan penting dalam perkembangan teknologi saat ini terutama di bidang elektronika. Penggunaan bahan semikonduktor tidak hanya pada perangkat yang dialiri arus lemah tetapi juga dengan perangkat yang dialiri arus kuat. Dalam memahami bahan semikonduktor sangat penting untuk mengetahui susunan celah pita energi antara pita valensi dan konduksinya. Pada bahan konduktor memiliki pita konduksi dan pita valensi yang saling menumpuk. Bertolak belakang dengan bahan isolator yang pita konduksi dan pita valensinya terpisah cukup jauh. Untuk semikonduktor jarak pita konduksi terpisah tidak jauh dari pita valensinya. Sangat dimungkinkan akan bertumpuk bila ada panas, medan magne dan tegangan yang cukup tinggi. Sebagai ilustrasi digambarkan perbandingan celah pita energi untuk isolator konduktor dan semikonduktor.



Gambar 12.1. Celah Pita Energi pada Beberapa Bahan.

Intan merupakan isolator yang baik dengan resistivitas yang tinggi. Karakteristik konduktivitas panasnya pun sangat baik. Celah pita energi antara

pita valensi dengan pita konduksinya sebesar 6 eV. Untuk bahan semikonduktor celah pita energinya berkisar antara 0,12 – 5,3 eV. Nilai ini lebih rendah dari pada bahan isolator. Pada silikon besar dari celah pita energi ini sebesar 1,1 eV. Dari besarnya celah pita energi ini terlihat diperlukan energi yang tidak besar untuk membuat semikonduktor untuk menghantarkan arus listrik. Bahan semikonduktor terdiri atas semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik. Bahan semikonduktor intrinsik, merupakan bahan yang belum memperoleh tambahan unsur seperti silikon dan germanium. Untuk bahan semikonduktor ekstrinsik adalah bahan yang memperoleh tambahan unsur untuk memperoleh karakteristik khusus. Penambahan arsenikum pada bahan semikonduktor akan diperoleh bahan semikonduktor dengan tipe N. Berbeda bila ditambahkan boron yang akan diperoleh bahan semikonduktor dengan tipe P.

Tabel 12.1. Energi Ionisasi

Bahan pengotor	Si (eV)	Ge (eV)
Pospor	0,044	0,012
Arsen	0,049	0,013
Antimon	0,039	0,010
Boron	0,045	0,010
Aluminium	0,057	0,010
Gallium	0,065	0,011
Indium	0,160	0,011

Resistivitas listrik pada semikonduktor sangat bergantung terhadap temperatur. Pada temperatur rendah ketika mendekati temperatur dari helium cair, resistivitas sebuah semikonduktor tidak dapat dibedakan dengan isolator. Resistivitas semikonduktor memiliki negatif koefisien temperatur yang berbeda dari konduktor yang memiliki positif koefisien temperatur. Perbedaan antara semikonduktor dengan isolator adalah kuantitas resistivitas secara alamiahnya.

IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA
B	C	N	O	F
Al	Si	P	S	Cl
Ga	Ge	As	Se	Br
In	Sn	Sb	Te	I
Tl	Pb	Bi	Po	At

Gambar 12.2 Kelompok Semikonduktor.

Adapun macam-macam penggunaan semi konduktor seperti ditunjukkan pada tabel 12.2.

Tabel 12.2. Semikonduktor dan Penggunaannya

Semikonduktor	Penggunaan
Barium Titanate (Ba Ti)	Termistor (PTC)
Bismut Telurida (Bi ₂ Te)	Konversi termo elektrik
Cadmium sulfida (Cd S)	Sel Fotokonduktif
Gallium arsenida (Ga As)	Dioda, transistor, laser, led, generator gelombang mikro
Germanium (Ge)	Diode, transistor
Indium antimonida (In Sb)	Magnetoresistor, piezoresistor, detektor radiasi inframerah
Indium arsenida (In As)	Piezoresistor
Silikon (Si)	Diode, transistor, IC
Silikon Carbida (Si Cb)	Varistor
Seng Sulfida (Zn S)	Perangkat penerangan elektro
Germanium Silikon (Ge Si)	Pembangkitan termoelektrik
Selenium (Se)	Rectifier
Aluminium Stibium (Al Sb)	Diode penerangan
Gallium pospor (Ga P)	Diode penerangan

Semikonduktor	Penggunaan
Indium pospor (In P)	Filter inframerah
Tembaga Oksida	Rectifier
Plumbun Sulfur (Pb S)	Foto sel
Plumbun Selenium (Pb Se)	Foto sel
Indium Stibium (In Sb)	Detektor inframerah, filter inframerah, generator Hall

Bahan semikonduktor yang paling banyak digunakan adalah silikon, germanium dan galium arsenida. Dari ketiganya, germanium adalah salah satu bahan semikonduktor paling awal yang digunakan. Germanium memiliki empat elektron valensi, yang merupakan elektron yang terletak di kulit terluar atom. Jumlah elektron valensi dalam bahan semikonduktor menentukan konduktivitasnya. Meskipun merupakan langkah penting dalam evolusi bahan semikonduktor, germanium sebagian besar telah tidak digunakan lagi karena kalah tenar dengan bahan semikonduktor paling populer saat ini yaitu silikon.

Silikon telah digunakan secara luas sebagai bahan semikonduktor sejak 1950-an. Unsur yang paling melimpah di bumi setelah karbon, silikon memiliki empat elektron valensi dan meleleh pada suhu yang lebih tinggi dari germanium (1.414 derajat celcius dibandingkan dengan germanium 938,3 derajat celcius). Silikon banyak tersedia dalam kuarsit. Proses ekstraksi, pemurnian, dan kristalisasi untuk silikon keduanya efisien dan ekonomis. Unsur mengkristal dalam bentuk berlian untuk ikatan yang relatif kuat, memberikan kristal silikon sifat mekanik yang kuat. Gallium arsenide adalah semikonduktor kedua yang paling umum digunakan saat ini. Tidak seperti silikon dan germanium, galium arsenida adalah senyawa, bukan unsur, dan dibuat dengan menggabungkan galium, dengan tiga elektron valensinya, dengan arsenik, yang memiliki lima elektron valensi. Delapan elektron valensi membuat perangkat gallium arsenide merespons sinyal listrik dengan cepat, membuat senyawa ini cocok untuk memperkuat sinyal frekuensi tinggi yang terlihat pada satelit televisi. Gallium arsenide memiliki beberapa keterbatasan, namun senyawa ini lebih sulit untuk diproduksi secara massal dibandingkan dengan bahan silikon, dan bahan kimia yang digunakan dalam produksi gallium arsenide cukup beracun.

Selain galium arsenida, senyawa silikon dioksida memiliki karakteristik yang lebih unggul daripada silikon, memungkinkannya digunakan sebagai isolator, lapisan pasivasi, dan lapisan bangunan pada perangkat silikon oksida logam (MOS), sejenis medan gerbang berinsulasi transistor efek. Silikon dioksida memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan celah pita yang lebih lebar daripada silikon, membuatnya menjadi isolator yang efektif, dan senyawanya mudah terdeposit pada bahan lain.

Sementara bahan yang paling penting dalam sebagian besar pembuatan semikonduktor untuk akhir abad kedua puluh dan awal abad kedua puluh satu dimana silikon mencapai batas kegunaannya. Tuntutan untuk sirkuit terintegrasi yang lebih kecil dan lebih cepat telah mendorong efisiensi material sejauh mungkin, dengan pakar industri khawatir silikon akan segera mencapai batas Hukum Moore. Penelitian bahan baru sedang berlangsung, dengan beberapa bahan yang menjanjikan untuk masa depan. Gallium nitrida adalah bahan berdaya tinggi dapat digunakan untuk konversi daya yang lebih efisien dan lebih cepat dalam sistem jaringan listrik karena medan energi kritisnya yang tinggi. Semikonduktor berbasis antimonida dan bismutida mulai digunakan dalam sensor inframerah yang ditingkatkan untuk sektor medis dan militer. Grafena memiliki potensi untuk melampaui silikon sebagai bahan semikonduktor serba guna, tetapi komersialisasi luas dapat berlangsung selama dua puluh lima tahun lagi. Pirit dapat digunakan untuk menggantikan unsur tanah jarang kadmium telluride, yang banyak digunakan dalam sel surya tetapi persediaannya terbatas. Pirit berlimpah, murah, dan tidak beracun.

Bahan semikonduktor memiliki karakteristik khusus yang berkaitan dengan konduktivitas listrik. Masa depan semikonduktor tergantung pada apakah bahan baru dengan karakteristik ini dapat diproduksi secara massal dengan biaya yang serupa dengan silikon. Bahan yang memungkinkan konduktivitas listrik yang alamiah disebut konduktor. Contohnya termasuk emas, perak, dan tembaga. Isolator, di sisi lain, memiliki resistansi tinggi dan mencegah konduktivitas listrik. Karet, kaca, dan keramik adalah isolator. Semikonduktor, seperti namanya, memiliki karakteristik konduktor dan isolator. Biasanya dalam bentuk kristal, semikonduktor memiliki jumlah elektron bebas yang rendah, yang diperlukan untuk konduktivitas. Sebaliknya, atom-atomnya mengelompok bersama untuk membentuk kisi kristal yang memungkinkan konduktivitas listrik, tetapi hanya dalam kondisi yang tepat. Pada suhu rendah, semikonduktor memungkinkan

sedikit atau tidak ada konduktivitas dan bertindak sebagai isolator. Pada suhu kamar atau ketika terkena cahaya, tegangan, atau panas, bagaimanapun, mereka dapat menghantarkan listrik. Keadaan semu antara konduktor dan isolator inilah yang membuat semikonduktor sangat penting untuk perangkat elektronik, karena mereka mengontrol bagaimana, kapan, dan dimana listrik mengalir.

Logam menghantarkan listrik karena elektron bebasnya dapat bergerak bebas antar atom, karena listrik membutuhkan aliran elektron dari satu atom ke atom lainnya. Semikonduktor seperti silikon murni memiliki sedikit elektron bebas dan bertindak lebih seperti isolator. Perilaku silikon dapat didorong ke arah konduktivitas melalui proses yang disebut doping. Doping mencampur kotoran kecil ke dalam bahan semikonduktor. Kotoran menambahkan atom donor ke bahan dasar untuk mendorong konduktivitas. Jumlah pengotor yang ditambahkan ke bahan semikonduktor sangat kecil (sedikitnya satu atom donor per sepuluh juta atom semikonduktor) tetapi cukup untuk memungkinkan konduktivitas listrik. Dua kategori pengotor yang digunakan, tipe-N dan tipe-P.

Semikonduktor tipe-N termasuk fosfor atau arsenik. Kedua zat memiliki lima elektron valensi. Ketika ditambahkan ke kisi silikon, salah satu elektron doping tidak memiliki ikatan apa pun, sehingga tersedia untuk memungkinkan aliran listrik. Elektron memiliki muatan negatif, sehingga semikonduktor ini disebut semikonduktor tipe-N. Semikonduktor tipe-P didoping dengan boron atau galium. Dua elemen doping hanya memiliki tiga elektron valensi. Ketika semua material bercampur dengan kisi silikon, beberapa elektron silikon tidak memiliki ikatan apa pun, memungkinkan konduktivitas listrik. Kurangnya elektron menciptakan muatan positif, sehingga silikon yang didoping dengan boron atau galium disebut semikonduktor tipe-P.

Ketika sirkuit terintegrasi diproduksi, komponen sirkuit seperti transistor dan kabel disimpan di permukaan wafer kristal silikon tipis. Film komponen tipis kemudian dilapisi dengan zat tahan foto, di mana pola sirkuit diproyeksikan menggunakan teknologi fotolitografi. Ini menghasilkan lapisan sirkuit tunggal, dengan transistor pada level terendah. Proses ini kemudian diulang dengan banyak sirkuit yang terbentuk di atas satu sama lain dan basis semikonduktor.

Manufaktur semikonduktor menyediakan perangkat keras dasar untuk hampir semua perangkat elektronik. Ini digunakan untuk amplifikasi energi, switching, konversi energi, sensor, dan banyak lagi. Produk dan komponen

umum yang dibuat dengan bahan semikonduktor meliputi transistor bipolar, dioda, transistor efek medan, sirkuit terintegrasi, transistor efek medan persimpangan, dioda pemancar cahaya (LED), transistor efek medan semikonduktor oksida logam (MOSFET) dan penyearah yang dikendalikan silikon. Bahan semikonduktor merupakan komponen penting dari perangkat elektronik, membuatnya penting untuk hampir semua industri besar. Secara global, lebih dari seratus miliar semikonduktor digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Sektor yang sangat bergantung pada bahan semikonduktor meliputi kecerdasan buatan, energi bersih, energi terbarukan, komunikasi, komputasi, energi, kesehatan, *internet of things* dan militer.

Dengan hampir semua sektor industri bergantung pada perangkat elektronik, pasar semikonduktor relatif stabil. Bahan-bahan yang diperlukan untuk produksi awal hingga pengemasan semikonduktor berkisar dari biaya yang tersedia mulai dari silikon dan keramik yang tersedia hingga logam tanah jarang yang mahal.

Pasar untuk bahan semikonduktor mencapai lebih dari \$50 miliar pada tahun 2018 dan diperkirakan akan mencapai nilai lebih dari \$70 miliar pada akhir tahun 2025. CAGR yang diproyeksikan antara tahun 2018 dan 2025 diperkirakan sebesar 4,32 persen. Sementara beberapa bahan semikonduktor murah dan berlimpah (silikon menjadi contoh yang paling jelas) REE yang digunakan dalam produksi dielektrik tinggi dan pemolesan kimia-mekanis bisa mahal. Beberapa faktor berkontribusi terhadap nilai REE. Proses yang diperlukan untuk memisahkan REE dari batuan tempat mereka ditemukan sulit dan mahal, membutuhkan ribuan tahap untuk mengekstrak dan memurnikan bahan jadi. Sulitnya mengekstrak UTJ dari bahan baku menyebabkan banyak perusahaan pertambangan memilih untuk tidak mengejar keuntungan UTJ. China adalah salah satu dari sedikit negara yang fokus pada penambangan dan pemurnian REE, sehingga negara tersebut memproduksi 85 persen pasokan tungsten dan molibdenum dunia. Cengkeraman China pada produksi REE memungkinkannya untuk tidak hanya menetapkan harga tetapi juga menggunakan bahan semikonduktor yang berharga sebagai senjata politik. Pada tahun 2010 Cina menghentikan semua penjualan REE ke Jepang karena perselisihan mengenai penahanan Jepang atas seorang kapten nelayan Cina. Apakah China akan memilih untuk menggunakan ekspor REE selama perang perdagangan AS-

China yang sedang berlangsung akan menjadi perhatian dalam menjaga stabilitas energi dunia.

Beyond CMOS mengacu pada potensi teknologi logika digital masa depan yang berkembang melampaui batas penskalaan CMOS saat ini. Batasan ini dirancang untuk menjaga intensitas dan kecepatan perangkat dalam upaya memerangi efek pemanasan. Logika digital adalah komponen mendasar dalam pembuatan perangkat elektronik dan logika. Itu yang memungkinkan kita untuk membuat sirkuit, memeriksa chip komputer, dan melakukan fungsi lain yang diperlukan untuk keberhasilan sistem. Akronim CMOS, yang merupakan kependekan dari *Complementary Metal Oxide Semiconductor*, biasanya CMOS digunakan untuk menggambarkan sakelar dasar yang biasanya hidup dan mati dalam produk semikonduktor modern. Ini berarti bahwa Beyond CMOS mengacu pada teknologi masa depan mengenai logika digital, atau teknologi masa depan, yang dapat diandalkan untuk mewakili urutan dan sinyal dalam sirkuit digital. Teknologi ini diantisipasi untuk melampaui batas penskalaan CMOS saat ini, yang telah membentang lebih dari satu urutan besarnya dalam ukuran fitur dan dua kali lipat dalam kecepatan.

Diluar penelitian dan pengembangan CMOS juga berfokus pada perluasan teknologi sirkuit terpadu ke pendekatan baru yang mendasar untuk menentukan cara terbaik untuk kemajuan teknologi setelah berakhirnya penskalaan dimensi CMOS. Untuk alasan ini, banyak teknologi yang diteliti terlihat berbeda dari teknologi semikonduktor kemarin dan sekarang. Tujuan menyeluruh dari Beyond CMOS adalah untuk mensurvei, menilai, dan membuat katalog perangkat yang muncul dan arsitektur baru yang layak untuk potensi jangka panjang dan kematangan teknologinya dan untuk mengidentifikasi tantangan ilmiah dan teknologi yang membuat penerimaan mereka oleh industri semikonduktor sebagai hal yang dapat diterima. risiko untuk pengembangan lebih lanjut (diluar CMOS). Para peneliti berharap dapat menciptakan teknologi memori volatil dan non-volatil untuk menggantikan opsi SRAM dan FLASH yang umum digunakan dalam aplikasi yang sesuai. Batas penskalaan saat ini telah menciptakan kebutuhan untuk mendapatkan memori yang dapat diakses secara elektrik yaitu kecepatan tinggi, kepadatan tinggi, daya rendah, dapat disematkan, kemungkinan tidak mudah menguap. Sistem memori saat ini sangat beragam ukurannya. Beberapa mungkin sangat kecil sehingga berbasis gigabyte (seperti sistem seluler) dan yang lain memerlukan penyimpanan senilai exabyte. Tidak

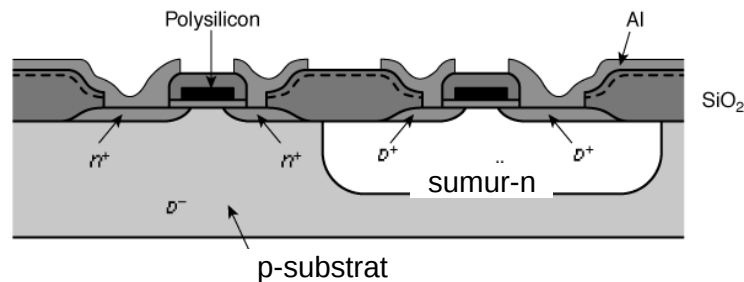
peduli ukurannya, bagaimanapun, tantangannya sama dan kebanyakan sistem komputer tidak berjalan secara konsisten pada beban puncak. Server data saat ini membutuhkan jumlah daya yang luar biasa bahkan ketika tingkat pemanfaatannya rendah. Masalah seperti ini menyoroti betapa berharganya memori yang persisten. Jika kemampuan ini tidak memerlukan penyegaran konstan, itu bisa berarti beban yang sangat ringan untuk perangkat logika yang harus dihadapi selama operasi. Sebanyak sepertiga dari daya sistem komputer besar digunakan untuk daya penyegaran; dengan daya yang dibebaskan, pengguna perangkat dapat mengoperasikan komputer lebih cepat dan lebih kuat.

IRDS™ berusaha mengidentifikasi perangkat Beyond CMOS yang akan membantu memungkinkan paradigma komputasi di luar kemampuan arsitektur dan teknologi CMOS konvensional. Beyond CMOS dari IRDS™ secara khusus dibuat untuk mengidentifikasi peluang penelitian, menilai perangkat saat ini, dan memetakan perangkat yang muncul. Sejumlah komponen menjadi dasar dari upaya Beyond CMOS IRDS™. Pembahasan ini sangat menekankan pada memori yang muncul, penyimpanan, logika, dan perangkat proses informasi. Ada juga beberapa bidang aplikasi baru yang sangat menarik bagi mereka yang terlibat dengan IRDS™. Komputasi saraf, keamanan perangkat keras, dan analitik data besar merupakan bagian integral dari pekerjaan Beyond CMOS.

Peneliti Beyond CMOS telah mencatat bahwa komunitas sirkuit, arsitektur, dan perangkat saat ini bekerja menuju berbagai tujuan. Para peneliti melihat pentingnya mensinergikan pengembangan perangkat yang muncul untuk memungkinkan keuntungan yang signifikan dalam bidang komputasi. IRDS™ juga mengakui bahwa meskipun penskalaan CMOS konvensional dan Hukum Moore diperkirakan akan berlanjut di tahun-tahun mendatang, jelas bahwa arah penelitian mendekati batas penskalaan tradisional. Faktor-faktor seperti peningkatan biaya dan efek fisik mendasar kemungkinan akan menghentikan penskalaan seperti yang banyak diketahui saat ini. Peta jalan tersebut mengakui bahwa dimensi kritis dan distribusi statistik menghadirkan hambatan bagi upaya untuk memperluas penskalaan CMOS. IRDS™ sangat berfokus pada kinerja tinggi dengan konsumsi daya rendah. Kemajuan dan inovasi terbaru dalam bidang teknologi telah mengalihkan fokus ini ke arah paradigma, fungsionalitas, dan aplikasi komputasi yang lebih baru. Peta jalan tersebut menjabarkan sejumlah prinsip panduan untuk penelitian teknologi Beyond CMOS saat ini dan di masa depan seperti variabel keadaan komputasi selain hanya muatan

elektron, sistem kesetimbangan non-termal, interaksi transfer energi baru, manajemen termal skala nano, proses pembuatan sub-litografis dan arsitektur alternatif.

Mekanisme yang sangat penting untuk dipelajari adalah pembentukan rangkaian terintegrasi *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS). Penampang lintang yang disederhanakan dari inverter CMOS yang umum ditunjukkan pada Gambar 12.1. Proses CMOS mengharuskan transistor kanal-n (NMOS) dan kanal-p (PMOS) dibangun dibahan silikon yang sama. Untuk mengakomodasi kedua jenis perangkat tersebut, daerah khusus yang disebut sumur harus dibuat dimana bahan semikonduktor berlawanan dengan jenis kanalnya. Transistor PMOS harus dibuat di substrat tipe-n atau sumur-n, sementara perangkat NMOS berada di substrat tipe-p atau sumur-p.



Gambar 12.3 Penampang Lintang Sumur-n CMOS

Penampang melintang pada Gambar 12.3 menunjukkan proses pembentukan sumur-n pada CMOS, dimana transistor NMOS diimplementasikan pada substrat yang didoping-p dan perangkat PMOS ditempatkan pada sumur-n. Seiring dengan perkembangan jaman, teknik modern menggunakan sumur ganda yang menggunakan sumur n dan p yang ditumbuhkan pada permukaan epitaksial. Proses CMOS memerlukan beberapa langkah yang besar, disetiap langkahnya terdiri atas operasi dasar yang berulang kali selama dalam periode proses pembuatan.

Pertumbuhan silikon dioksida adalah salah satu proses yang paling penting dalam fabrikasi transistor MOS. Atribut SiO₂ yang membuatnya menarik bagi industri semikonduktor adalah:

- Mudah disimpan pada berbagai bahan dan ditanam secara termal pada wafer silikon.
- Tahan terhadap banyak bahan kimia yang digunakan selama etsa bahan lain, sementara memungkinkan dirinya untuk digores secara selektif dengan bahan kimia tertentu atau digores kering dengan plasma.

- c. Dapat digunakan sebagai bahan pemblokiran untuk implantasi ion atau difusi banyak pengotor yang tidak diinginkan.
- d. Antarmuka antara silikon dan silikon dioksida memiliki cacat mekanik dan listrik yang relatif sedikit, meskipun dengan node teknologi yang lebih baru dan geometri yang berkurang, bahkan cacat kecil pun harus diatasi.
- e. Memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan celah pita yang relatif lebar, menjadikannya isolator yang sangat baik.
- f. Memiliki stabilitas suhu tinggi hingga 1600°C , menjadikannya bahan yang berguna untuk proses dan integrasi perangkat.

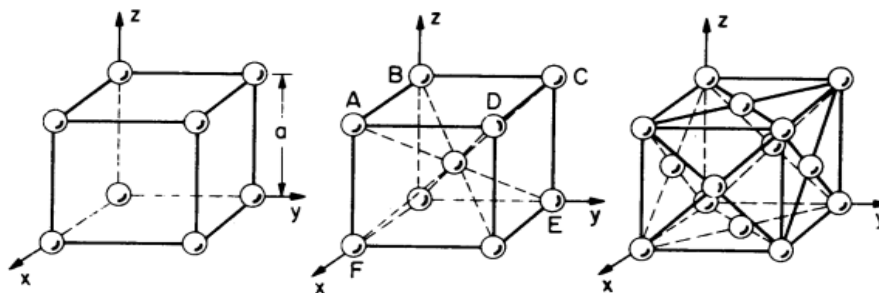
Permintaan saat ini untuk produk konversi daya berperforma tinggi dan berbiaya rendah didorong oleh ekspektasi konsumen akan masa pakai baterai yang lebih lama, pengisian daya yang lebih cepat untuk ponsel, pengembangan kendaraan listrik (EV), atau peralatan listrik mereka. Konsumen menginginkan komunikasi data yang lebih cepat bersama dengan kemampuan kecerdasan buatan (AI) yang kuat, yang dikirimkan dengan biaya lebih rendah dari jaringan luas pusat data skala besar, kumpulan server telekomunikasi, dan menara komunikasi 5G mendatang yang terintegrasi ke dalam lingkungan hidup sehari-hari. Inti dari pencapaian kinerja tinggi, serta menurunkan biaya di muka dan pengoperasian untuk aplikasi ini, adalah elektronika daya canggih yang memproses tegangan utilitas listrik melalui beberapa tahap untuk akhirnya memberi daya pada perangkat kami secara efisien dan hemat biaya. Selama bertahun-tahun, kemajuan ini telah dimungkinkan oleh inovasi berkelanjutan yang menghasilkan keluarga transistor daya silikon tegangan tinggi dan rendah yang tidak pernah gagal mengejutkan kami dengan peningkatan lebih lanjut dari generasi ke generasi.

Namun, sementara semikonduktor daya secara historis menggunakan substrat silikon, semikonduktor silikon terbatas dalam hal tegangan tinggi. Untuk alasan ini, bahan lain seperti galium nitrida (GaN) semakin banyak digunakan sebagai pengganti silikon. Perusahaan teknologi GaN telah mengembangkan teknologi galium nitrida (GaN) inovatif yang menawarkan frekuensi switching yang lebih tinggi sambil menjaga kerugian pada tingkat yang sangat rendah. Perkembangan teknologi GaN oleh produsen semikonduktor ini menawarkan masa pakai baterai yang lebih lama dan pengisian yang lebih cepat untuk ponsel, kendaraan listrik (EV), dan peralatan-peralatan listrik, serta kemampuan komunikasi data yang lebih cepat. Teknologi daya GaN yang inovatif dari Infineon

mencakup teknologi 600V CoolGaN™ GIT HEMT. HEMT, yang merupakan singkatan dari transistor mobilitas elektron tinggi, dibentuk dengan menyatukan dua substrat yang berbeda secara struktural untuk membentuk transistor heterojunction untuk mempromosikan mobilitas elektron yang lebih tinggi dan memungkinkan peralihan yang stabil selama operasi GaN HEMT.

2. Struktur Kristal

Kebanyakan bahan semikonduktor adalah kristal tunggal (seperti pada Gambar 12.4) yang menunjukkan tiga sel unit kristal kubik - kubik sederhana, kubik berpusat pada badan, dan berpusat pada muka kubik. Elemen semikonduktor, silikon dan germanium, memiliki berlian struktur kisi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.4. Konfigurasi ini termasuk dalam keluarga kristal kubik dan dapat digambarkan sebagai dua subkisi fcc yang saling berpenetrasi dengan satu sublattice terpisah dari yang lain dengan seperempat jarak sepanjang diagonal kubus. Semua atom identik dalam kisi berlian, dan setiap atom di kisi berlian dikelilingi oleh empat tetangga terdekat yang berjarak sama yang terletak pada sudut-sudut tetrahedron. Sebagian besar semikonduktor III-V (misalnya GaAs) mempunyai kisi zincblende (seperti pada Gambar 12.4) yang identik dengan kisi berlian, pengecualian bahwa satu subkisi fcc memiliki atom Kolom III (Ga) dan yang lainnya memiliki Kolom V atom (As).



Gambar 12.4 Tiga Unit Kubik Kristal

C. Latihan Soal

1. lapisan tunggal atom oksigen ($\sim 5 \times 10^{14}$ atom/cm²) ditempatkan pada permukaan dari wafer silikon seluas 1 cm². Silikon dicairkan dan seluruh oksigen pada permukaannya terlarut. Seiring dengan pendinginan, silikon kembali ke

bentuk kristal tunggal. Dengan asumsi konsentrasi oksigen dalam silikon adalah 0,1 ppm, seberapa tebal wafer silikon tersebut? Densitas atom dari silikon sebesar 5×10^{22} atom/cm³.

2. Tentukan densitas doping yang terendah dalam satuan cm³ yang dapat diberikan pada perangkat dengan luasan 1×1 nm² dengan ketebalan 4 lapisan atom (1 nm)?

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 13

KARAKTERISTIK KELISTRIKAN BAHAN SEMIKONDUKTOR

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu menjelaskan karakteristik kelistrikan bahan semikonduktor.

B. Uraian Materi

1. Karakteristik Kelistrikan

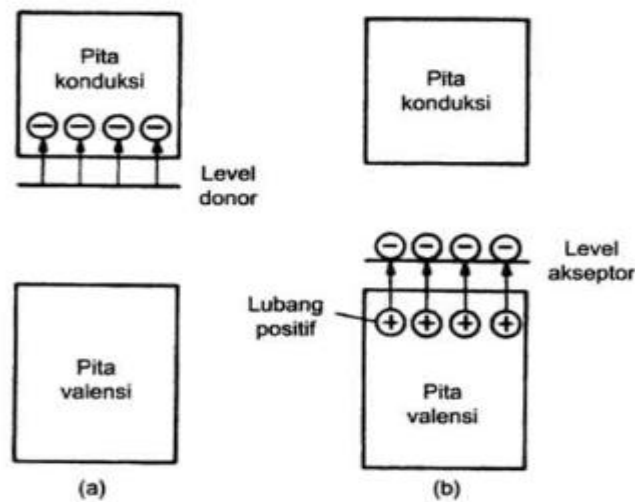
Dari pertemuan sebelumnya telah disampaikan untuk membuat bahan semikonduktor dapat mengalirkan arus listrik diperlukan energi sehingga pita konduksi dapat bertumpang tindih dengan pita valensi. Seperti silikon yang memiliki celah pita energi sebesar 1,1 eV, dengan asumsi beda energi antara dua ion yang terdekatnya dengan jarak berkisar $1 \text{ \AA}$ (10^{-10} m) akan memerlukan gradien medan sebesar $1,1 \text{ V}/10^{-10} \text{ m}$ sehingga elektron dapat bergerak dari pita valensi ke pita konduksi. Besaran energi yang diberikan sebesar itu menjadi kurang praktis. Teknik lainnya adalah dengan pemanasan. Pada temperatur kamar sangat dimungkinkan ada elektron yang mampu melintas dari pita valensi ke pita konduksi. Elektron yang berada pada bagian teratas pita valensi yang dapat berpindah ke bagian bawah pita konduksi dapat disebabkan adanya energi termal. Distribusi jumlah elektron yang terkuat dan mampu melintasi celah energi dapat dihitung dengan distribusi kemungkinann Fermi-Dirac:

$$P(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/kT}} \quad (13.1)$$

dimana E_f = tingkat fermi; k = konstanta boltzman = $8,64 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$, $E-E_f = E_g/2$
 E_g = besaran celah energi termal kT pada temperatur kamar (0,026 eV).

Perpindahan elektron pada pita valensi akan meninggalkan lubang. Pada semikonduktor intrinsik jumlah lubang pada pita valensi akan memiliki jumlah elektron pada pita konduksi. Peningkatan temperatur akan mempercepat proses pergerakan elektron dan lubang dengan arah yang berlawanan. Konsentrasi

pembawa muatan elektron (n_e) dan lubang (n_h) akan mempengaruhi besarnya konduktivitas listrik.



Gambar 13.1 Skema Struktur Pita Energi Semikonduktor (a) Tipe-n, (b) Tipe-p.

Untuk semikonduktor ekstrinsik, sedikit berbeda pada jumlah lubang pada pita valensi dan elektron pada pita konduksi. Hal ini disebabkan karena adanya sumbangan dari unsur tambahan dari luar. Penambahan unsur luar ini disebut dengan *doping*, dan unsur yang ditamabbkannya disebut *dopant*. Penambahan *dopant* ini dapat meningkatkan konduktivitas listrik dari semikonduktor. Pada kristal silikon yang *didoping* dengan unsur yang terletak pada golongan 5 pada susunan berkala unsur seperti P, As dan Sb, akan menyumbangkan elektron lebih. Unsur P ketika mengikat Silikon, 4 elektron terluarnya akan mengikat Silikon dan menyisakan satu elektro terluarnya. Elektron ini relatif bebas dan tingkat energinya sangat dekat dengan pita konduksi. Kondisi ini dinamakan unsur P mendonorkan elektronnya dan muatan negatif pada semikonduktor. Sejumlah energi ionisasi diperlukan untuk menggerakan elektron dari pita valensi sehingga berada pada pita konduksi. Dari hukum kekekalan massa, dimana jumlah elektron pada pita konduksi dan lubang pada valensi harus berjumlah sama, pada bahan semikonduktor dengan doping P ini, jumlah lubang pada pita valensinya akan lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah elektron pada pita konduksinya. Oleh karena itu, elektron pada pita konduksi menjadi pembawa muatan mayoritas.

Mekanisme pembawa muatan pada bahan semikonduktor akan berbeda dengan silikon yang *didoping* dengan unsur yang terletak pada golongan 3 ada

susunan berkala unsur seperti Ga, Al dan In. Sebagai kasus penambahan unsur Al yang memiliki jumlah elektron terluar 3 buah. Pada saat Al disisipkan pada silikon, akan terjadi kekurangan jumlah elektron untuk membentuk susunan tetrahedral dimana seharusnya Al mengikat 4 atom Si. Hal akan terjadi adalah akan ada elektron ekstra dari unsur Si yang terdekat sehingga akan menimbulkan lubang pada unsur Si yang menyumbangkan satu elektronnya sehingga susunan tetrahedral tetap terbentuk. Selama pada temperatur 0 K, lubang akan tetap terikat pada unsur pengotor. Seiring dengan meningkatnya temperatur, lubang dapat terlepas dari unsur pengotornya dan menjadi muatan pembawa dalam proses konduksinya. Sebuah ikatan lubang bebas dari unsur pengotornya diperlukan energi ionisasi yang besarnya sama dengan energi ionisasi elektronnya pada unsur dopan pada kristal yang sama. Tingkat ikatan lubang disebut tingkat akseptor dimana aluminium menerima sebuah elektron yang berada di atas pita valensinya. Jumlah Lubang yang ada akan menjadi pembawa muatan mayoritas.

2. Elektroda Semikonduktor

Sifat-sifat elektroda semikonduktor dan perbedaannya dibandingkan dengan elektroda logam dapat dipahami dengan memeriksa struktur elektroniknya. Semikonduktor unik dalam sifat elektroniknya karena struktur pita. Asal usul pita energi umumnya dibahas menggunakan teori pita, dimana gerakan elektron tunggal dalam kisi kristal dipertimbangkan. Diasumsikan bahwa tidak ada interaksi antara elektron individu atau antara elektron dan titik kisi (energi potensial adalah nol). Oleh karena itu, model ini kadang-kadang disebut sebagai model elektron hampir bebas.

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 \Psi(x,y,z) = E \cdot \Psi(x,y,z) \quad (13.2)$$

Dimana m_e adalah massa diam elektron bebas, E adalah energi kinetik, Ψ adalah gelombang elektron tunggal dan $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$. Solusi untuk persamaan 13.2 diberikan oleh

$$\Psi_k(r) = \frac{1}{\sqrt{V}} \cdot e^{i \cdot k \cdot r} \quad (13.3)$$

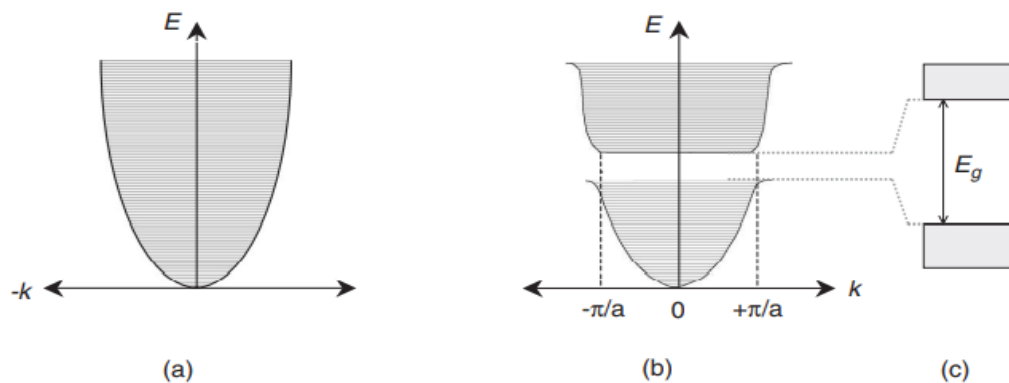
Dimana $r(x,y,z)$ adalah vektor posisi dan k adalah vektor gelombang yang diberikan oleh $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$. Pengganda, $1/\sqrt{V}$ adalah konstanta normalisasi yang menjelaskan keberadaan elektron dalam elemen volume V . Berdasarkan panjang gelombang *de Broglie wavelength* yang terkait dengan partikel mikroskopis, momentum linier dan energi kinetik elektron dalam kristal tunggal dapat dinyatakan dalam k dengan persamaan (13.4).

$$P = h.k \quad (13.4)$$

dan persamaan

$$E(k) = \frac{h^2 k^2}{2.m_0} \quad (13.5)$$

dimana $h = h / 2 \pi$ dan h adalah konstanta planck. Plot energi $E(k)$ vs. k dapat dilihat dalam Gambar 13.2.



Gambar 13.2 Plot Energi $E(k)$ vs. K

Dimana hubungan pada dasarnya parabola dan nilai energi yang diizinkan didistribusikan secara kontinu dari nol hingga tak terhingga. Namun, dalam kristal nyata, elektron berinteraksi dengan medan potensial periodik, $U(r)$, dibuat oleh ion-ion yang tersusun teratur dalam kisi sedemikian rupa sehingga.

$$U(r) = U(r + R) \quad (13.6)$$

Dimana R adalah vektor satuan. Dalam situasi ini, gelombang elektron menyebar pada titik-titik kisi ini. Ini analog dengan difraksi sinar-X pada kisi

periodik yang diatur oleh hukum Bragg. Gelombang elektronik, yang memenuhi kondisi Bragg, menyebar di titik kisi dan tidak dapat merambat di kisi. Ini mengarah pada pembentukan celah energi terlarang.

Disebut celah pita. Daerah dalam k antara $\pm \pi/a$ telah mengizinkan status energi dan disebut zona Brillouin pertama. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 13.2. Gambar yang lebih familiar dari struktur pita untuk ahli kimia digambarkan pada Gambar 13.2c dimana nilai rata-rata energi sepanjang tiga sumbu vs jarak di unit sewenang-wenang diplot. Elektron diisi dalam pita yang diizinkan ini mirip dengan pengisian elektron dalam orbital atom dan molekul. Probabilitas elektron dapat menempati tingkat energi tertentu E diatur oleh statistik Fermi–Dirac dan dinyatakan sebagai.

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/k_B T}} \quad (13.7)$$

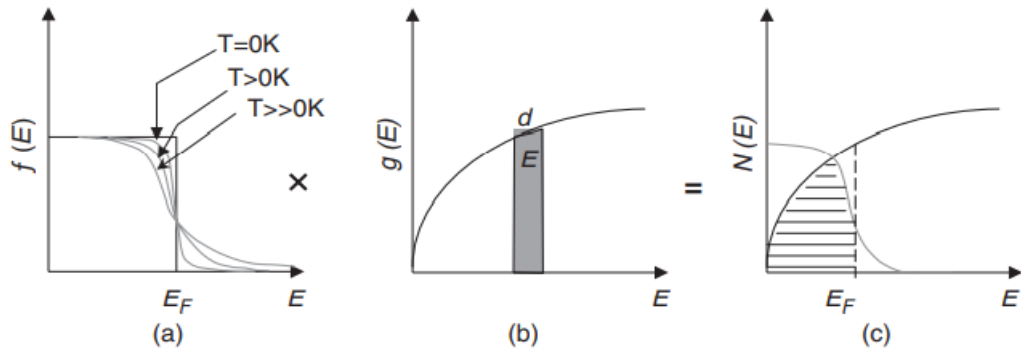
Dimana E_F mengacu pada tingkat Fermi. Dari sudut pandang ahli kimia, E_F mewakili potensial elektrokimia elektron ($\bar{\mu}_e$) dalam padatan. k_B adalah konstanta Boltzmann. Untuk fungsi distribusi probabilitas $f(E)$ sebagai fungsi E pada berbagai temperatur diplot pada Gambar 13.3. Dalam padatan, keadaan energi tidak terdistribusi secara merata diseluruh nilai energi. Sebaliknya, jumlah keadaan per satuan volume (yaitu, kepadatan keadaan) meningkat dengan meningkatnya nilai energi. Kerapatan (tersedia) keadaan dalam interval energi dE sebagai fungsi dari E diberikan oleh

$$g(E)dE = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} E^{1/2} dE \quad (13.7)$$

yang diplot pada Gambar 13.3. Produk dari persamaan 13.7 dan 13.8 akan menghasilkan ekspresi berikut yang menyatakan kerapatan keadaan yang ditempati:

$$N(E)dE = F(E).g(E)dE \quad (13.8)$$

Fungsi diplot pada Gambar 13.3 dan mewakili kerapatan keadaan dalam interval energi dE . Area hash mewakili kepadatan status yang diduduki. Tergantung pada



Gambar 13.3 Distribusi Femi Dirac

3. Efek Iradiasi Semikonduktor

Semikonduktor dengan neutron, elektron, dan ion dapat memiliki efek dramatis pada sifat fisiknya dan telah menjadi bidang penelitian aktif sejak 1960-an. Minat awal dirangsang oleh aplikasi semikonduktor di ruang angkasa, di mana mereka dikenai medan radiasi yang intens. Ini diikuti oleh perkembangan dalam industri mikroelektronika yang muncul, di mana pengetahuan tentang struktur elektronik dari cacat dan pengotor menjadi semakin penting, dan tetap demikian hingga hari ini. Akibatnya, banyak penelitian sampai saat ini telah berkonsentrasi pada struktur dan sifat cacat akibat iradiasi dan efeknya pada transportasi atom dan sifat listrik semikonduktor.

Cacat yang diinduksi iradiasi memiliki efek dramatis pada sifat listrik semikonduktor terutama karena mereka meningkatkan, menurunkan, atau menjebak pembawa muatan, sehingga mengendalikan konsentrasi pembawa. Mereka mencapai ini dengan menciptakan tingkat energi dalam celah pita yang bertindak sebagai donor, akseptor, perangkap, atau pusat rekombinasi untuk pembawa muatan, dan melalui interaksi dengan atom dopan yang menonaktifkannya. Akibatnya, iradiasi dapat mengubah resistivitas semikonduktor umum sebesar 5-6 kali lipat. Misalnya, iradiasi ion-diri ndapat meningkatkan resistivitasnya sebesar 4-5 kali lipat karena perangkap elektron pada divacancy dan kompleks vacancy-oxygen. Kekosongan memiliki tiga tingkat di celah pita, dua di antaranya terletak 0,43eV dan 0,24eV di bawah pita konduksi, dan bertindak sebagai perangkap elektron, dan satu di antaranya

terletak 0,20eV di atas pita valensi, dan bertindak sebagai lubang. perangkap. Pusat kekosongan-oksigen memiliki tingkat tunggal yang terletak 0,17eV dibawah pita konduksi yang juga bertindak sebagai perangkap elektron. Sebaliknya, resistivitas semikonduktor intrinsik dapat dikurangi dengan beberapa urutan besarnya, dalam hal ini dengan konduksi hopping yang diinduksi cacat. Karena difusi atom dapat dimediasi oleh cacat titik, iradiasi dapat memiliki efek dramatis yang sama pada proses transportasi atom. Jelas, pemahaman tentang efek tersebut sangat bergantung pada pemahaman sifat-sifat cacat akibat iradiasi.

Neutron, elektron, dan ion yang energetik menciptakan cacat pada semikonduktor melalui tumbukan langsung dengan inti atom. Eksitasi dan ionisasi elektron memiliki sedikit efek, kecuali mungkin dalam kasus ekstrim. Foton energik (sinar γ) dapat menghasilkan elektron berenergi tinggi dengan hamburan Compton. Misalnya, kuantum 1,25MeV γ dari Sumber ^{60}Co menghasilkan elektron dengan energi dalam kisaran hingga 1,05MeV. Dalam hal ini kerusakan radiasi yang disebabkan oleh elektron.

Neutron termal ($\sim 0,03\text{eV}$) juga dapat menimbulkan cacat meskipun energinya kurang dari yang dibutuhkan untuk membuat perpindahan secara langsung. Atom menangkap neutron termal untuk menghasilkan inti metastabil yang kemudian dapat meluruh, memancarkan partikel energik atau kuantum dalam prosesnya. Misalnya, ^{30}Si , yang terdapat dalam silikon dengan kelimpahan alami $\sim 3\%$, dapat menangkap neutron untuk menghasilkan ^{31}Si . Inti ini metastabil dan berubah menjadi ^{31}P dengan peluruhan β , memancarkan elektron 1,49MeV dalam prosesnya. Kerusakan radiasi dapat dihasilkan dari atom target yang mundur dan dari produk peluruhan energik.

Penangkapan neutron termal juga dapat mengubah konstituen semikonduktor menjadi atom dopan, seperti pada contoh di atas dimana silikon ditransmutasikan menjadi fosfor. Proses ini, disebut transmutasi doping, dapat diterapkan pada sebagian besar semikonduktor, dan merupakan cara baru dimana sifat listrik semikonduktor dapat langsung dimodifikasi.

Karena perbedaan massa yang besar antara elektron dan inti atom, elektron mentransfer sebagian kecil energinya dalam tumbukan. Oleh karena itu, elektron berenergi tinggi diperlukan untuk membuat cacat. Misalnya, energi elektron minimum yang diperlukan untuk menggantikan atom galium dalam GaAs adalah 233keV, dan untuk energi elektron kurang dari 1MeV hanya satu atom galium

atau arsenik yang dapat dipindahkan. Oleh karena itu, elektron menghasilkan distribusi cacat titik terisolasi yang relatif seragam pada jangkauannya, yang dapat berjumlah banyak milimeter untuk energi dalam kisaran 1–10MeV. Neutron, di sisi lain, dapat mentransfer fraksi yang signifikan (5-10%) dari energi mereka ke atom kisi. Untuk neutron 1MeV, energi maksimum yang ditransfer ke atom galium atau arsenik adalah ~50keV, jauh lebih tinggi daripada energi perpindahan.

Oleh karena itu, neutron semacam itu dapat menghasilkan cacat kaskade hingga 10^3 . Namun di zona berdiameter ~20nm, sesuai dengan kerapatan cacat di zona $\sim 3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, karena neutron berinteraksi melalui potensial nuklir penampang tumbukannya relatif kecil dan mereka juga menciptakan distribusi cacat titik yang relatif seragam pada jangkauannya, yang dapat mencapai puluhan sentimeter. Ion energik (keV–MeV) dapat mentransfer hingga 100% energi datangnya ke atom kisi, dan memiliki penampang hamburan yang relatif besar yang bervariasi dengan energi. Oleh karena itu distribusi cacat umumnya lebih kompleks daripada yang dihasilkan oleh elektron dan neutron dan bervariasi dengan kedalaman. Ion cahaya berenergi tinggi awalnya kehilangan sebagian besar energi mereka melalui proses elektronik, dan dalam tumbukan, menghasilkan recoil dengan energi yang relatif rendah.

Oleh karena itu, distribusi kerusakan terutama terdiri dari cacat titik terisolasi dalam kasus ini. Ion berat, di sisi lain, kehilangan banyak energinya melalui tumbukan atom dan dapat mentransfer sebagian besar energinya ke atom target. Kaskade tumbukan yang dihasilkan dapat memiliki tinggi, dan bahkan dapat membuat volume kaskade benar-benar amorf.

Secara umum, kerusakan yang diciptakan oleh ion berada di antara dua ekstrem ini, dan kaskade tumbukan yang khas terdiri dari campuran cacat titik, kluster cacat, dan zona amorf. Yang penting, semikonduktor yang paling umum (misalnya Si, Ge, GaAs, GaP, InP, ZnS) mengalami transisi fase kristal ke-amorf ketika diradiasi ke pengaruh tinggi dengan ion energik. Fase amorf dapat terbentuk secara langsung dalam kaskade tumbukan energik atau secara tidak langsung sebagai akibat dari akumulasi cacat. Dalam kedua kasus, penyinaran terus menerus menyebabkan aglomerasi bahan amorf dan akhirnya pembentukan lapisan amorf terus menerus. Lapisan ini dapat direkristalisasi dengan epitaksi fase padat dari bahan kristal yang mendasarinya dengan pemanasan.

4. Cacat Titik Semikonduktor dan Interaksinya

Identifikasi dan karakterisasi cacat titik dalam semikonduktor bergantung pada pengembangan dan penerapan banyak teknik eksperimental. Ini termasuk: Efek hall dan pengukuran konduktivitas untuk mempelajari cacat dan kinetika nealing dan tingkat energi yang terkait dengan pembawa yang diaktifkan secara termal; penyerapan optik, fotokonduktivitas, fotoluminesensi (PL), hamburan Raman dan spektroskopi transien tingkat dalam (DLTS) untuk mempelajari struktur elektronik rinci dari cacat; spektroskopi inframerah (IR) untuk mempelajari mode getaran lokal; dan resonansi paramagnetik elektron (EPR) dan varian seperti resonansi magnetik yang terdeteksi secara optik (ODMR) dan resonansi ganda elektron-nuklear (ENDOR), untuk mempelajari struktur atom lokal. Informasi tersebut, dikombinasikan dengan anil dan kinetika reaksi dan pemodelan teoritis telah digunakan untuk membangun pemahaman yang komprehensif dari cacat tertentu.

Cacat itu dapat bertindak sebagai perangkap elektron atau lubang berarti bahwa cacat tersebut dapat berada dalam keadaan muatan yang berbeda, masing-masing dengan mobilitas atom yang berbeda. Karena cacat seluler lebih mungkin untuk bergabung kembali atau bereaksi dengan cacat dan kotoran lainnya, doping dapat memiliki efek signifikan pada respons bahan terhadap iradiasi. Misalnya, kekosongan silikon memasukkan empat tingkat ke dalam celah pita, dan sebagai akibatnya dapat ada dalam lima status muatan yang berbeda, V^{2+} , V^+ , V^0 , V^- , dan V^{2-} , tergantung pada posisi tingkat Fermi dalam bahan. Pada n-type material disinari pada suhu rendah, keadaan muatan V^{2-} dominan, dan anil pada suhu sekitar 75K dengan energi aktivasi 0,18eV. Sebagai perbandingan, cacat V^{2+} dominan pada p-type, dan anil pada ~175K dengan energi aktivasi 0,32eV, dan pada bahan yang tidak didoping V^0 cacat dominan, dan anil pada ~230K dengan energi aktivasi 0,45eV. Karena semuanya bergerak pada suhu ruangan, mereka dapat bermigrasi untuk membentuk kelompok yang lebih kompleks.

Akibatnya, cacat dominan yang diamati pada silikon yang diiradiasi adalah divacancy dan kompleks kekosongan oksigen, dan ini bertanggung jawab atas resistivitas yang diamati dan perubahan masa pakai pembawa selama penyinaran suhu kamar silikon. Efek keadaan muatan serupa diamati di semua semikonduktor.

Interaksi titik cacat dengan dopan dan pengotor residu lainnya juga sangat penting dan dapat menyebabkan berbagai kompleks titik-cacat-pengotor, masing-masing dengan tingkat cacat dan karakteristik anilnya sendiri. Ini juga dapat menyebabkan penonaktifan atom dopan substitusi. Misalnya, dalam p-InP, dopan seperti seng dan kadmium adalah perangkap yang efektif untuk kekosongan fosfor dan interstisial. Pengenalan cacat menonaktifkan dopan ini, berkontribusi pada peningkatan resistivitas.

Karena teknik preparasi yang digunakan untuk membuat semikonduktor dapat mempengaruhi jenis dan konsentrasi pengotor yang ada dalam bahan, hal itu juga berpengaruh pada sifat dan konsentrasi cacat akibat iradiasi. Misalnya, silikon yang ditanam di Czochralski mengandung karbon dan oksigen sebagai kontaminan, dan berbagai kompleks cacat terkait karbon dan oksigen dihasilkan oleh iradiasi. Susunan kompleks cacat-pengotor seperti itu sangat besar, dan meskipun banyak yang telah dicirikan, studi mereka terus menjadi bidang penelitian yang aktif.

5. Cacat Annealing

Pada prinsipnya, cacat akibat iradiasi dapat dihilangkan dengan annealing pada suhu tinggi. Namun, interaksi mereka dapat menyebabkan cacat tingkat tinggi yang membutuhkan suhu yang lebih tinggi dan lebih tinggi untuk menghilangkannya. Misalnya, dalam silikon, kekosongan terisolasi dan interstitial anil pada suhu kamar, dan diamati dalam keadaan terperangkap, seperti divacancies, atau kompleks cacat-pengotor, seperti kekosongan-oksigen, atau kompleks karbon-interstisial. Kompleks ini dan kompleks terkait biasanya anil pada suhu hingga 350° C.

Dalam semikonduktor yang diiradiasi ion, cacat titik sering berkumpul menjadi cacat yang diperpanjang selama anil. Ini dapat mencakup kompleks cacat menengah, trombosit, kesalahan susun, loop dislokasi, garis dislokasi, dan rongga. Karena iradiasi ion menyuntikkan atom tambahan ke dalam kisi, sebagian besar cacat yang diamati setelah anil bersifat interstisial (eks trinsik). Misalnya, dalam silikon, cacat sering diamati selama anil dalam kisaran suhu hingga 800° C. Loop dislokasi diamati setelah anil pada 850° C, dan beberapa lokasi tetap bahkan setelah anil pada 1000° C selama beberapa jam. Sekali lagi, perilaku cacat yang diperluas dapat dipengaruhi oleh struktur elektroniknya dan

karenanya dengan doping. Misalnya, kecepatan dislokasi terisolasi dapat ditingkatkan sebesar 1-2 orde magnitudo dengan doping.

Masalah yang menarik banyak perhatian, dan yang menggambarkan dengan baik banyak kerumitan efek iradiasi dalam semikonduktor, adalah difusi sementara boron yang ditingkatkan dalam silikon. Ini terjadi selama anil silikon yang ditanamkan boron, dan memiliki efek bahwa boron berdifusi lebih cepat dari yang diharapkan selama tahap awal anil. Komponen yang ada pada konsentrasi di atas $\sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ juga menjadi tidak aktif dan tidak bergerak secara elektrik. Proses ini telah menjadi batasan utama untuk pembuatan sangat dangkal p-n dalam silikon, dan oleh karena itu telah menjadi fokus penelitian intensif. Upaya penelitian Kerusakan implantasi berkembang menjadi distribusi cacat yang diperpanjang selama anil, dan ini memancarkan interstisial saat larut pada suhu dalam kisaran $650\text{--}850^\circ \text{C}$. Interstisial bermigrasi melalui material dan bereaksi dengan boron substitusi untuk membentuk boron bergerak– kompleks interstisial. Ini berdifusi dengan cepat, menghasilkan peningkatan difusi. Karena suplai interstisial, kira-kira sama dengan jumlah atom yang ditanamkan, habis, proses berhenti, menjelaskan sifat transiennya. Kelebihan interstisial juga bereaksi dengan boron substitusi ke membentuk gugus boron yang tidak aktif secara elektrik untuk konsentrasi diatas $\sim 10^{18} \text{atom boron cm}^{-3}$ diamati merupakan konsekuensi langsung dari cacat akibat iradiasi beserta interaksi yang terjadi.

Iradiasi semikonduktor dengan neutron, elektron, dan ion dapat memiliki efek dramatis pada transportasi atom dan sifat listriknya, dan memiliki telah berperan dalam mengembangkan pemahaman tentang cacat dan interaksinya dalam bahan penting ini. Pemahaman ini telah, sebagian besar, mendukung keberhasilan industri elektronik mikro dan optoelektronik modern, dan terus melakukannya, memastikan bahwa efek iradiasi dalam semikonduktor tetap menjadi bidang penelitian yang menarik dan aktif.

C. Latihan Soal

1. Jelaskan mekanisme konduksi pada semikonduktor ekstrinsik dengan pengotor valensi 5!
2. Jelaskan tujuan adanya daerah SCH pada dioda *edge-emitting* laser!

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

PERTEMUAN 14

BAHAN SUPERKONDUKTOR

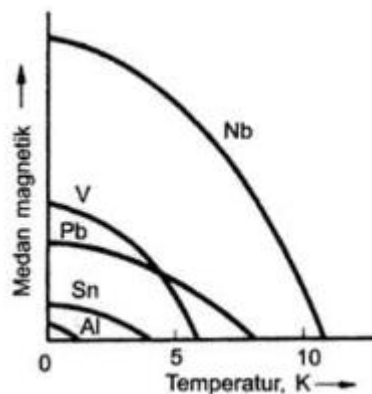
A. Tujuan Pembelajaran

Setelah selesai mengikuti materi pada pertemuan ini, mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan jenis dan karakteristik kelistrikan bahan superkonduktor.

B. Uraian Materi

1. Bahan Superkonduktor

Sudah kita ketahui bahan konduktor mampu mengalirkan arus listrik. Namun bahan ini tetap memiliki resistansi, yang ditunjukkan dengan nilai resistivitas. Resistivitas dapat mendekati nilai nol bila bahan berada pada lingkungan pada temperatur kritis (T_c). Pengembangan bahan superkonduktor adalah melakukan rekayasa untuk memperoleh bahan yang memiliki resistivitas mendekati nol dengan temperatur kritis (T_c) yang mendekati temperatur kamar. Karakteristik lainnya yang ingin dicapai adalah medan magnet yang dimiliki lebih kecil daripada medan kritisnya (H_c).



Gambar 14.1. Sifat Superkonduktor Beberapa Unsur pada Bidang Medan Magnet dan Temperatur.

Pada Gambar 14.1 ditampilkan karakteristik superkonduktor beberapa unsur dalam medan magnetik dan temperatur tertentu. Bahan superkonduktor akan kehilangan karakteristiknya bila ditempatkan pada lingkungan yang temperturnya

di atas temperatur kritis dengan medan magnetnya di atas kuat medan kritis. Saat ini telah diketahui 30 unsur dan lebih dari 100 paduan yang dapat dibentuk untuk memiliki karakteristik super konduktor. Saat ini temperatur kritis tertinggi dimiliki oleh paduan Nb_3Sn dengan nilai sebesar 18,1 K. Paduan ini disintesis oleh Mathias yang berasal dari USA.

Karakteristik superkonduktor dari bahan dengan nilai konduktivitas yang baik pada temperatur kamar tidak selalu menunjukkan nilai yang lebih baik ketika mendekati temperatur kritisnya. Karakteristik bahan superkonduktor dibagi menjadi dua tipe. Tipe I merupakan bahan superkonduktor yang dapat mengalirkan arus pada permukaannya hingga kedalaman 10^4 mm dalam suatu medan magnet. Unsur yang termasuk tipe ini adalah Pb, Ag dan Sn. Tipe II merupakan bahan superkonduktor yang mampu mempertahankan karakteristik superkonduktornya sebelum menjadi konduktor normal meskipun medan magnet dan temperatur kritisnya dilampaui. Umumnya bahan tipe II memiliki temperatur kritis yang lebih tinggi dari tipe I. Superkonduktor tipe I saat mengalirkan arus listrik yang konstan akan menghasilkan medan magnet tanpa rugi-rugi. Hal ini disebabkan medan listrik di semua tempat bernilai nol. Berbeda dengan tipe II akan muncul rugi-rugi yang sangat kecil. Pada Tabel 14.1 disampaikan beberapa bahan superkonduktor dengan temperatur kritisnya.

Tabel 14.1 Temperatur kritis (T_c) beberapa bahan superkonduktor.

Unsur	T_c (K)	Senyawa	T_c (K)
Ti	0,49	Na Bi	2,2
Zn	0,82	Nb Zn	10,8
Al	1,20	Mo N	12,0
Tl	2,38	Mo Re	12,6
In	3,40	V ₂ ,95 Ga	14,4
Sn	3,73	Nb N	15,2
Hg	4,16	V ₃ Si	17,1
Ta	4,39	Nb ₃ Al	18,0
V	5,1	Nb ₃ Sn	18,1

Pb	7,22	Cu S	1,6
Nb	8,00	Pb Sb	1,5
Tc	11,2		
Th	1,37		
U	0,68		

Pada tahun 1986 J. G. Bednorz dan K. A Muller menemukan kelompok superkonduktor "hangat" baru, berbasis oksida-keramik campuran. Superkonduktor lanthanum-rembaga oksida ini mempunyai T_c sekitar 35 K, jauh di atas temperatur hidrogen cair. Sejak itu, telah dikembangkan tiga kelompok oksida campuran dengan nilai T_c yang lebih tinggi, semuanya sekitar 100 K. Bahan seperti ini menggugah optimisme pada teknologi superkonduktor; pertama, untuk menggunakan nitrogen cair dan bukan hidrogen cair dan kedua, prospek untuk menghasilkan superkonduktor temperatur ruang. Kelompok oksida pertama dikembangkan dengan mencampur dan memanaskan tiga oksida Y_2O_3 , BaO , dan CuO . Proses ini menghasilkan oksida campuran $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, yang kadang-kadang disebut senyawa 1-2-3 dari YBCO. Strukturnya terdiri dari penumpukan tiga sel satuan tipe-perovskit satu di atas yang lain; sel paling atas dan bawah mengandung ion barium di pusat dan ion tembaga di sudut, sel yang berada di tengah mempunyai Itrium di pusatnya. Ion oksigen terletak di tengah-rengah kisi sel akan tetapi bidang selain bidang yang mengandung barium, mempunyai kekurangan ion oksigen (kekosongan dinyatakan sebagai x dalam rumus oksida). Jadi, struktur ini mempunyai bidang ion tembaga dan ion oksigen yang mengandung kekosongan, dan rantai ion tembaga-oksigen yang tegak lurus padanya. YBCO mempunyai nilai T_c sekitar 90 K yang hampir-hampir tidak berubah apabila Ytrium digantikan oleh elemen tanah jarang lainnya. Keluarga bahan oksida kedua adalah $Bi-Ca-Sr-Cu-O_x$ dengan ion logam masing-masing dengan rasio 2111, 2122 atau 2223. Oksida 2111 hanya mempunyai satu lapisan tembaga-oksigen antara lapisan bismut-oksigen, 2122 mempunyai dua dan 2223 mempunyai tiga lapisan tembaga-oksigen di antara lapisan bismut-oksigen, yang meningkatkan T_c hingga sekitar 105 K. Kelompok ketiga yang berbasis $Ti-Ca-Ba-Cu-O$ dengan struktur 2223 dengan tiga lapisan tembaga-oksigen dan T_c sekitar 125 K.

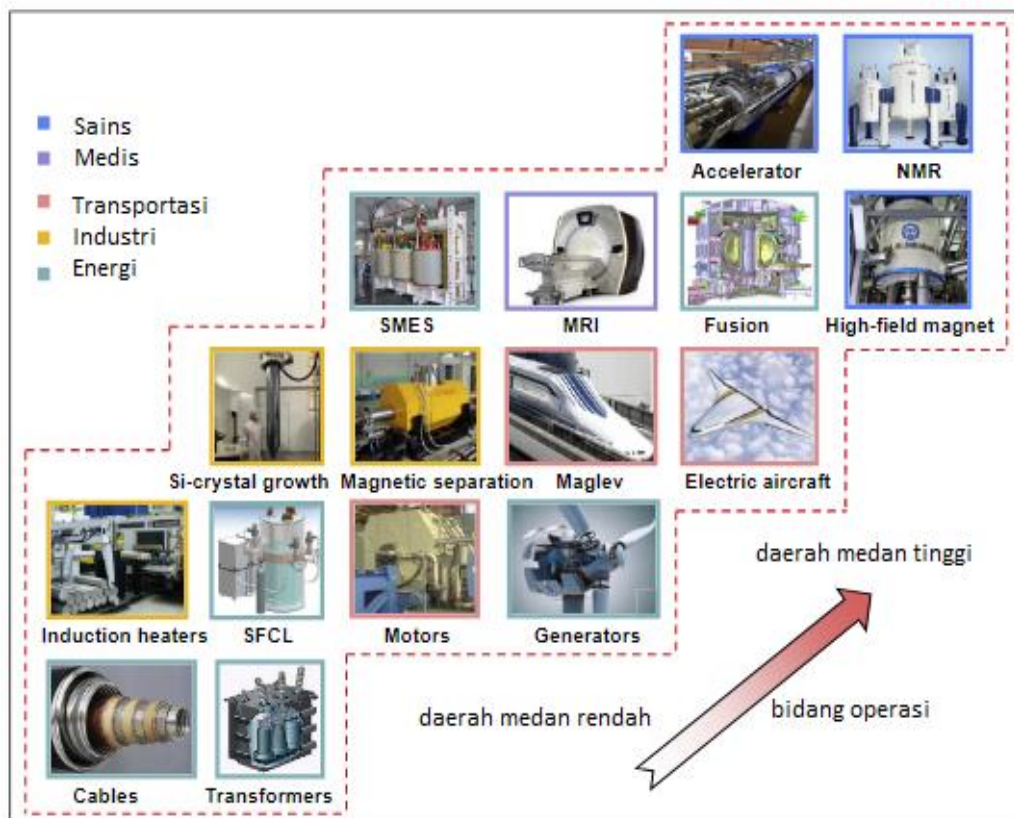
Meskipun superkonduktor oksida ini mempunyai nilai T_c tinggi dan nilai medan magnetik kritis (H_c) yang tinggi pula, disayangkan bahwa bahan ini mempunyai nilai J_c , kerapatan arus kritis, yang sangat rendah, J_c yang tinggi diperlukan apabila hendak digunakan untuk magnet superkonduksi yang kuat. Penerapan di bidang listrik tidak mungkin tanpa peningkatan nilai J_c sebanyak beberapa orde agar setara dengan superkonduktor konvensional, yaitu sekitar 10^6 A/cm². Diperkirakan bahwa batas butir, dislokasi, void dan partikel pengotor dalam bahan polikristalin merupakan penyebab J_c yang rendah. Kristal tunggal mempunyai nilai J_c sekitar 10^5 A/cm² dan bahan berrekstur, yang dibuat dengan teknik pertumbuhan lelehan, mempunyai nilai sekitar 10^4 A/cm², tetapi kedua proses tersebut mempunyai penerapan komersial terbatas. Penerapan di bidang elektronik lebih menjanjikan karena pada bidang lembaran tipis (1 μ m) inilah diperoleh nilai J_c yang tinggi. Dengan pengendalian deposisi yang cermat, lembaran tipis kristal epitaksial dan lembaran tipis kristal tunggal dengan $J_c \gg 10^6$ A/cm² serta kebergantungan pada medan magnetik yang rendah telah berhasil dibuat.

2. Implementasi Bahan Superkonduktor

Untuk banyak logam dan senyawa, ketika didinginkan ke suhu yang cukup rendah, resistivitasnya tiba-tiba turun ke nol. Fenomena ini, yang dikenal sebagai superkonduktivitas, pertama kali diamati oleh fisikawan Belanda Heike Kamerlingh Onnes. Pada tahun 1908, Kamerlingh Onnes berhasil mencairkan helium pada suhu 4,2 K, dan kemudian pada tahun 1911, ketika ia mengukur resistivitas logam pada suhu rendah, ia menemukan superkonduktivitas merkuri pada 4,2 K. Setelah menemukan hambatan nol dari superkonduktor, pada tahun 1933, fisikawan Jerman W. Meissner dan R. Ochsenfeld menemukan bahwa jika superkonduktor

didinginkan di bawah suhu transisi T_c dalam medan magnet, medan magnet akan sepenuhnya dikeluarkan dari superkonduktor. Fenomena ini disebut efek Meissner, yang merupakan karakteristik penting lain dari superkonduktivitas. Setelah itu dilakukan pengamatan terhadap superkonduktivitas di banyak zat lain, dan beberapa di antaranya memiliki transisi suhu superkonduktor yang lebih tinggi. Pada saat yang sama, karena sifat superkonduktor yang eksotis, beberapa peneliti juga telah membawa keluar penelitian ekstensif aplikasi praktis mereka.

Resistansi nol dan kerapatan arus tinggi memiliki dampak besar pada transmisi daya listrik dan juga memungkinkan magnet yang jauh lebih kecil dan lebih kuat untuk motor, generator, penyimpanan energi, peralatan medis, pemisahan industri, dan penelitian ilmiah, sedangkan pengecualian medan magnet menyediakan mekanisme untuk levitasi magnetik superkonduktor, sebagai ditunjukkan pada Gambar 14.2. Memiliki rentang suhu operasi yang berbeda dan medan magnet yang diperlukan, dan juga pendekatan pendinginan dan sifat material, saat ini aplikasi industri superkonduktor dapat dikategorikan ke dalam aplikasi seperti kabel daya, pembatas arus gangguan, transformator, dan pemanas induksi pada 65-77 K dengan nitrogen cair sebagai pendingin dan medan <1 T, aplikasi seperti motor, generator, maglev, perangkat penyimpanan energi, sistem pencitraan resonansi magnetik (MRI) dan magnetik pemisahan pada suhu di bawah 50 K dan medan di atas 1 T, dan magnet medan tinggi (>10 T) untuk fusi, akselerator, MRI medan tinggi, resonansi magnetik nuklir (NMR), dan penelitian ilmiah pada suhu rendah daerah (biasanya pada 4,2 K menggunakan helium cair sebagai pendingin).



Gambar 14.2 Penggunaan Bahan Superkonduktor

Dalam penelitian awal untuk superkonduktor, menemukan bahwa keadaan superkonduktor tidak hanya terkait dengan suhu, tetapi juga dengan magnet eksternal medan dan arus dalam superkonduktor. Ketika medan magnet yang diterapkan pada superkonduktor lebih besar dari nilai kritis tertentu H_c , keadaan superkonduktor akan hancur. Ketika arus melewati superkonduktor lebih tinggi dari arus kritis I_c , keadaan superkonduktor juga akan hancur, bahkan jika medan magnet luar tidak diterapkan. Oleh karena itu, kisaran bahan superkonduktor yang berlaku terutama dibatasi oleh ketiga parameter tersebut. Sejauh ini, meskipun ribuan superkonduktor telah ditemukan, yang dengan nilai praktis terbatas pada Nb-Ti, Nb₃Sn, superkonduktor oksida berbasis tembaga, MgB₂, dan besi-superkonduktor berbasis, seperti yang dirangkum dalam Tabel 14.2

Selama tahun 1911 hingga 1932, superkonduktor suhu rendah (LTS) seperti timbal, timah, niobium, dan logam lain ditemukan sebagai superkonduktor, dan di antaranya niobium memiliki T_c tertinggi 9,2 K. Dalam dekade berikutnya, banyak paduan dan senyawa berbasis karbon dan nitrogen dengan superkonduktivitas ditemukan. Di antara paduan superkonduktor dan senyawa intermetalik ini, Nb-Ti dan Nb₃Sn reporting pada tahun 1961 dan 1954, masing-masing, adalah yang paling menjanjikan untuk aplikasi praktis, dengan T_c 9.5 K dan 18.1 K, masing-masing. Pada 4.2 K, Nb-Ti dan Nb₃Sn memiliki medan kritis atas 11 T dan 25 T, masing-masing secara aktif. Keduanya memiliki kerapatan arus lebih dari 10^5 A/cm², yaitu sekitar 2 kali lipat lebih tinggi daripada konduktor tembaga. Oleh karena itu, Nb-Ti dan Nb₃Sn memungkinkan konstruksi superkonduktor magnet yang dapat menghasilkan medan magnet yang jauh lebih tinggi daripada magnet resistif konvensional.

Tabel 14.2 Parameter Material Dasar dan Kerapatan Arus Kritis yang Relevan untuk Superkonduktor

Bahan	T_c max (K)	H_{c2} , 4.2k (T)	J_c , 4.2k (A/cm ²)	Panjang Koherensi ξ_{ab} (nm)	Anisotropi γ_h	Teknologi Kabel	Tipe Kabel
Nb-Ti	9.5	11.5	4×10^5 (5 T)	4	Negligible	\	Round wire

Bahan	T_c max (K)	H_{c2} , 4.2K (T)	J_c , 4.2K (A/cm ²)	Panjang Koherensi ξ_{ab} (nm)	Anisotropi γ_h	Teknologi Kabel	Tipe Kabel
Nb ₃ Sn	18	25	$\sim 10^6$	3	Negligible	bronze process internal Sn process powder in tube	Round wire
MgB ₂	39	18	$\sim 10^6$	6.5	2-2.7	Powder in tube internal Mg diffusion	
REBCO	92	>100	$\sim 10^7$	1.5	5-7	Coated conductor	Flat tape
Bi-2223	108	>100	$\sim 10^6$	1.5	50-90	Powder in tube	Flat tape
Bi-2212	90					Powder in tube	Wire or tape
1111 IBS	55	>100	$\sim 10^6$	1.8-2.3	4-5	Powder in tube	Wire or tape
122 IBS	38	>80	$\sim 10^6$	1.5-2.4	1.5-2	Powder in tube	Wire or tape
11 IBS	16	>40	$\sim 10^6$	1.2	1.1-1.9	Powder in tube	Wire or tape

Kemudian superkonduktor cuprate berbasis bismut (BSCCO) termasuk $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}-$

Cu_2O_8 (Bi-2212) ditemukan dan $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223) dengan T_c s hingga 110 K. Sebagai contoh disajikan pada Gambar 14.3, mengenai suhu operasi dan medan magnet, Bi-2223 dan REBCO dapat membawa arus super besar hingga 30-50 K di medan dan pada 77 K di medan sendiri, jadi mereka menjanjikan tidak hanya untuk medan tinggi magnet dioperasikan di daerah suhu rendah atau sedang tetapi juga untuk aplikasi elektro-teknis dengan nitrogen cair jauh lebih murah sebagai pendingin. Di sisi lain, meskipun Bi-2212 hanya dapat digunakan pada suhu rendah (<20 K), ia memiliki keunggulan tersendiri untuk aplikasi medan tinggi. Pada tahun 2001, superkonduktivitas pada 39 K in MgB_2 ditemukan oleh kelompok Akimitsu di Universitas Aoyama-Gakuin. Trans-suhu posisi adalah yang tertinggi sejauh ini untuk senyawa intermetalik biner massal. MgB_2 menjanjikan untuk aplikasi aplikasi disekitar 20 K yang dapat dengan mudah dicapai dengan hidrogen cair atau cryocooler, dan dianggap menggantikan LTS tradisional seperti Nb-Ti dan Nb_3Sn yang digunakan dalam helium cair. Apalagi bahan baku yang melimpah dan bobot MgB_2 yang ringan juga membuatnya menarik untuk aplikasi praktis skala besar. Pada tahun 2008, penemuan superkonduktor berbasis besi oleh grup Hosono di Institut Teknologi Tokyo menandai datangnya 'zaman besi' superkonduktivitas T_c tinggi setelah 'zaman tembaga' yang ditandai oleh superkonduktor.

3. Superkonduktor Nb-Ti dan Nb_3Sn

Karena keuletannya yang bagus, paduan Nb-Ti dapat langsung dideformasi menjadi kabel panjang dari billet monofilamen dengan matriks tembaga dan billet multifilamen yang dibuat dengan merakit puluhan ribu kabel monofilamen. Segera setelah penemuannya, kabel superkonduktor Nb-Ti sepenuhnya diindustrialisasi pada tahun 1968 dan banyak digunakan di aplikasi praktis. Perlu dicatat bahwa saat ini paduan Nb-Ti masih merupakan bahan superkonduktor praktis termurah untuk aplikasi di wilayah suhu helium cair, karena bahan baku dan biaya produksi jauh lebih rendah daripada bahan superkonduktor lainnya. Di sisi lain, karena kerapuhan bahan, Nb_3Sn tidak dapat langsung dideformasi menjadi kabel seperti yang dilakukan untuk paduan Nb-Ti. Beberapa jenis proses dapat digunakan untuk fabrikasi kawat, termasuk proses perunggu (dimulai dengan batang paduan Nb dilapisi perunggu Cu-Sn ulet dan

kemudian dirakit di dalam tabung Cu-Sn lain untuk mendapatkan struktur multifilamen), proses Sn internal (dimulai dengan menempatkan inti Sn di tengah matriks Cu tertanam filamen Nb), dan proses PIT (dimulai dengan dengan mengemas bubuk Nb-Sn yang kaya Sn seperti Nb₆Sn₅ dan NbSn₂ dalam tabung Nb).

Dengan perlakuan panas untuk kabel pengerjaan dingin, fase superkonduktor Nb₃Sn dapat diperoleh dengan reaksi antara Sn dan Nb. Kunci untuk meningkatkan non-Cu J_c dari kabel Nb₃Sn adalah peningkatan penyematannya kapasitas. Karena penjepitan batas butir di Nb₃Sn tidak seefisien dan tidak sepadat penyematan α-Ti di Paduan Nb-Ti, penghalusan butir, dan pusat pinning buatan efektif untuk menjepit fluks. Karena meningkatnya kompleksitas pembuatan kawat, komersialisasi kabel superkonduktor Nb₃Sn direalisasikan setelah tahun 1970, dengan harga yang relatif lebih tinggi daripada superkonduktor Nb-Ti. Sejak tahun 1960-an, superkonduktor Nb-Ti dan Nb₃Sn telah sangat mendorong pengembangan magnet superkonduktor dan dengan demikian merangsang industri untuk bahan dan teknologi superkonduktor. Nb-Ti superkonduktor biasanya digunakan untuk memproduksi magnet superkonduktor yang menghasilkan medan magnet hingga 9 T pada 4,2 K atau 11 T pada 1,8 K. Saat ini, kabel superkonduktor Nb-Ti terutama digunakan dalam konstruksi sistem MRI, magnet superkonduktor untuk laboratorium, kereta levitasi magnetik, dan sebagainya, dengan konsumsi sekitar beberapa ribu ton setiap tahun. Untuk superkonduktor Nb₃Sn, ceruk mereka di pasar adalah aplikasi bidang tinggi di luar kemampuan Nb-Ti dan dalam kisaran hingga 23 T. Yang penting area aplikasi superkonduktor Nb₃Sn termasuk sistem MRI, perangkat NMR, akselerator partikel,

perangkat fusi tokamak, dan magnet medan tinggi untuk penelitian ilmiah. Mengambil aplikasi fusi untuk misalnya, dari 2008 hingga 2015 lebih dari 500 ton kabel Nb₃Sn dibeli untuk proyek reaktor eksperimental termonuklir internasional (ITER), yang menghasilkan peningkatan produksi Nb₃Sn global sepuluh kali lipat.

kemampuan. Sekarang kabel Nb₃Sn mutakhir adalah kabel internal-timah restacked-rod-process (RRP) dengan non-Cu J_c tertinggi sebesar 1,6–1,7 3 10⁵ A/cm² (4,2 K, 15 T), yang semakin mendekati persyaratan (1,5 3 10⁵ A/cm² pada 4,2 K, 16 T) lebih dari 5000 magnet dipol untuk Future Circular Collider. Untuk lebih meningkatkan kinerja J_c, penambahan Hf dan Zr untuk membentuk paduan

turner Nb-TaHf dan Nb-Ta-Zr dan inklusi nano diperkenalkan dengan teknik oksidasi internal untuk mengurangi butir ukuran telah menunjukkan potensi besar. Fabrikasi industri untuk paduan NbTa-Hf dengan ukuran butir rata-rata kurang dari 50 nm telah dicapai oleh logam ATl.

4. Superkonduktor Copper-oxide

Bahan superkonduktor tembaga-oksida memiliki T_c tinggi di atas suhu nitrogen cair (77 K) dan bahkan suhu gas alam cair (LNG) (113 K). Karena kelimpahan nitrogen yang sangat kaya, biaya pendinginan dengan nitrogen cair jauh lebih rendah dibandingkan dengan helium cair, sehingga memungkinkan untuk aplikasi industri skala besar berdasarkan teknologi superkonduktor. Meskipun T_c dari ketiganya senyawa superkonduktor cuprate Bi-2223, Bi-2212, dan REBCO jauh lebih tinggi daripada Nb-Ti dan Nb₃Sn, mereka jauh lebih sulit untuk diproses menjadi kabel dan pita karena kerapuhan keramikanya. Kristal seperti pelat dari senyawa cuprate terbentuk selama perlakuan panas suhu tinggi, dimana kandungan oksigen dalam senyawa keramik ini harus dikontrol untuk mendapatkan yang optimal fase superkonduktor. Selain itu, ada efek tautan lemah antara butiran mereka dengan butiran besar sudut batas, yang juga tidak bermanfaat bagi daya dukung arus dan dapat dikurangi dengan butir tekstur. Untuk superkonduktor Bi-2223, butir yang disejajarkan dengan ketidaksejajaran pada sumbu c <15 sangat penting untuk arus kritis antar butir yang tinggi. Karena Bi-2223 adalah fase metastabil dan akan terurai selama pencairan, orientasi butir dapat diperoleh dengan deformasi mekanis (penggulungan) dan proses perlakuan panas. Oleh karena itu, berdasarkan proses PIT, helai Bi-2223 berkinerja tinggi diproduksi dengan tampilan pita. Untuk superkonduktor Bi-2212, kabel atau pita PIT dapat dibuat karena terhubung dengan baik dan butiran bertekstur dapat diperoleh dari fase cair pada suhu lebih rendah dari titik leleh dari sarung perak. Teknik PIT tidak berlaku untuk REBCO karena hanya membawa arus kritis yang besar di sampel pita bertekstur sangat biaksial dengan ketidaksejajaran butir <5, yang sulit dicapai dengan teknik PIT. Hanya butuh beberapa tahun dari penemuan hingga komersialisasi kabel Bi-based pertama dan kaset karena pencapaian deformasi mekanis yang diinduksi tekstur butir. Sebaliknya, REBCO pita konduktor berlapis (panjang beberapa meter) pertama kali diproduksi hampir 20 tahun setelah penemuan senyawa dan setelah sekitar 10 tahun upaya R&D intens di AS, Eropa, dan

Jepang. Itu 1990-an adalah periode yang sangat aktif dalam pengembangan kabel dan pita Bi-based, sementara sebagian besar terobosan dalam konduktor berlapis REBCO dicapai selama tahun 2000-an.

a. BSCCO

Untuk pembuatan kabel dan pita BSCCO, metode PIT yang diperkenalkan di atas untuk Nb_3Sn digunakan untuk keduanya. Senyawa Bi-2223 dan Bi-2212. Bubuk awal, seperti oksida dan karbonat, dicampur dan dikalsinasi untuk mendapatkan prekursor yang dikemas ke dalam selubung logam, yang kemudian dideformasi secara mekanis menjadi kabel dan kaset. Paduan Ag atau Au diperlukan sebagai bahan selubung, bukan Cu dan logam lain untuk kabel BSCCO dan pita perekat, karena secara kimiawi kompatibel (yaitu, Ag hampir tidak bereaksi dengan prekursor) dan transparan terhadap oksigen (yaitu, Ag dapat mentransmisikan oksigen yang dilepaskan dari atau diserap ke dalam superkonduktor oksida selama perlakuan panas). Kabel multifilamen dapat dibuat dengan menyusun ulang monofilamen lebih lanjut kabel dalam selubung Ag dan kemudian mengulangi proses deformasi dingin. Untuk memperkuat kopling antar butir BSCCO, perlu dilakukan penyejajaran butir dengan orientasi acak. Karena BSCCO oksidamengkristal dengan tampilan seperti piring karena anisotropi tinggi, orientasi butir relatif mudah. Namun, pendekatan orientasi butir berbeda untuk Bi-2212 dan Bi-2223. Untuk kabel Bi-2212, pelelehan parsial diikuti oleh pendinginan bertahap diadopsi, sementara kaset Bi-2223 diproses dengan tekstur yang diinduksi rolling. Dalam kedua kasus, struktur mikro dengan orientasi uniaksial (sumbu c) diperoleh.

b. REBCO

Dibandingkan dengan superkonduktor BSCCO, REBCO memiliki anisotropi yang jauh lebih rendah dan J_c in-field yang jauh lebih tinggi pada 77 K. Namun, struktur butir selaras uniaksial (sumbu c) yang dicapai pada kabel BSCCO dengan tekstur yang diinduksi penggulungan atau pelelehan tidak memuaskan untuk REBCO untuk mendapatkan J_c antar butir yang tinggi dan tekstur butir biaksial diperlukan. Untuk mewujudkan tekstur biaksial, selain rute fabrikasi PIT, film REBCO diendapkan pada lapisan penyangga bertekstur biaksial, yang dilapisi pada substrat logam seperti pita yang panjang dan fleksibel. Selain itu, untuk perlindungan lingkungan dan stabilisasi termal, lapisan Ag setebal beberapa mm dan lapisan Cu yang lebih

tebal dilapisi pada konduktor. Sejak tahun 2003, berbagai pendekatan untuk memproduksi konduktor berlapis telah diterapkan di tingkat industri. Teknik substrat bertekstur termasuk deposisi berbantuan sinar ion (IBAD), substrat bertekstur biaksial berbantuan bergulir (RABiTS), dan deposisi substrat miring. Deposisi lapisan REBCO epitaxial juga dapat dicapai melalui berbagai rute, termasuk rute kimia, seperti deposisi organik logam (MOD) dan deposisi uap kimia organik logam (MOCVD), atau melalui rute fisik seperti deposisi laser berdenyut (PLD) dan co-evaporasi reaktif (RCE). Di antara mereka, MOD dan RCE adalah proses *ex situ* yang menggabungkan dua langkah: deposisi pra-kursor dan konversi berikutnya dari prekursor menjadi REBCO. Di sisi lain, deposisi dan pembentukan terjadi secara bersamaan selama proses *in situ* seperti PLD dan MOCVD. Proses PLD menyediakan struktur pinning cacat yang luas, perataan butir berkualitas tinggi, dan kelayakan untuk deposisi film tebal, tetapi membutuhkan peralatan yang lebih mahal dan memiliki laju deposisi yang lebih rendah. Itu Teknik MOCVD dan RCE memiliki tingkat deposisi tinggi dan area deposisi besar, tetapi produknya memiliki mikrostruktur dan kristalinitas melekat yang relatif buruk. Proses MOD memiliki kelebihan seperti biaya sistem yang rendah dan limbah solusi yang paling sedikit, tetapi produknya memiliki partikel penyemat yang lebih besar daripada yang diperoleh pada pertumbuhan PLD, dan pinning pada bidang yang lebih tinggi kurang efektif. Konduktor berlapis yang diproduksi dengan rute yang berbeda dapat digunakan untuk aplikasi yang berbeda sesuai dengan kinerjanya.

Sejauh ini, konduktor berlapis REBCO panjang (>1000 m) dengan arus kritis lebih dari 300 A/cm-lebar pada 77 K di medan sendiri telah dicapai oleh beberapa perusahaan. Pada tahun 2008, pita REBCO kelas kilometer pertama di dunia dikembangkan oleh SuperPower di Amerika Serikat dengan proses IBAD/MOCVD ($I_c = 227$ A/cm pada 77 K, di medan sendiri). Pada tahun 2016, SuNAM mengembangkan pita REBCO dengan panjang 1000 m dengan lebar 12 mm dengan $I_c > 800$ A/cm melalui IBAD/RCE proses. Dalam beberapa tahun terakhir, komersialisasi konduktor berlapis REBCO telah dicapai oleh perusahaan di AS (ASMC, SuperPower, STI), Jepang (SWCC, Fujikura, Sumitomo), Korea (SuNAM), Jerman (THEVA, d-NANO, Bruke), Rusia (SuperOx), dan China (Shanghai Superconductor, Samri, SCSC), dan

kemajuan pesat telah dibuat untuk konduktor berlapis REBCO panjang kinerja tinggi. IC mereka konduktor dilapisi komersial mencakup berbagai nilai, dari 100 A sampai lebih dari 250 A pada 77 K, self-field (untuk pita lebar 4 mm). Saat ini, penelitian untuk meningkatkan kemampuan membawa arus konduktor berlapis berfokus pada pengenalan pusat pinning buatan (APC) di lapisan keramik dan meningkatkan ketebalan lapisan keramik. Kombinasi struktur biaksial kaset REBCO dengan APC seperti sebagai nanopartikel atau nanorod non-superkonduktor secara efisien menyematkan vortisitas pada suhu tinggi, dan dengan demikian secara signifikan meningkatkan kinerja J_c di lapangan. Selain itu, diamati bahwa APC dapat digunakan untuk menyesuaikan anisotropi J_c , dan menjanjikan untuk lebih menurunkan anisotropi REBCO kaset. Ditemukan juga bahwa APC dapat menekan degradasi J_c dalam kaset REBCO dengan meningkatnya ketebalan lapisan superkonduktor. Dengan penyematan fluks yang ditingkatkan, lapisan keramik dengan ketebalan 5 mm, yang 5 kali lebih tebal dari pada konduktor berlapis komersial, dicapai oleh SuNAM dan KERI di Korea dan di University of Houston dengan I_c yang sangat tinggi mencapai 1300-1500 A/cm (77 K, *self-field*).

C. Latihan Soal

1. Jelaskan efek Meissner pada superkonduktor!
2. Apa yang dimaksud dengan isoelektronik dan berikan minimal 3 contoh!
3. Jelaskan karakteristik superkonduktivitas pada paduan yang serupa dengan struktur Na-CI, A15, Laves, Chevrel, Chalcogenides dan oksida!

D. Daftar Pustaka

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.

- Poole, C. K., Farach, H. A., & Creswick, R. J. (1999). Handbook of superconductivity. Elsevier.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai& Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

GLOSARIUM

- Paduan** : Campuran bahan berupa logam yang terdiri atas dua unsur atau lebih.
- Diagram Fasa** : Sebuah diagram yang menggambarkan hubungan antara kondisi batas lingkungan, komposisi dan daerah fasa yang stabil, umumnya dalam kondisi kesetimbangan.
- Hukum Bragg** : Persamaan yang menggambarkan kondisi difraksi yang dihasilkan oleh bidang kristalografi.
- Hukum Fick Pertama**: fluks difusi proporsional terhadap gradien konsentrasi. Hubungan persamaan ini menggunakan difusi dalam keadaan tunak.
- Hukum Fick Kedua**: laju waktu perubahan konsentrasi proporsional terhadap turunan kedua dari konsentrasi. Hubungan persamaan ini menggunakan difusi dalam keadaan tidak tunak.
- Keramik** : Campuran bahan antara unsur logam dan non logam dimana ikatan antar atomnya didominasi oleh ikatan ionik.
- Komposit Diperkuat serat**: komposit yang memiliki fasa dispersinya berupa serat.
- Konstanta Dielektrik**: Rasio antara permitivitas dalam bahan dengan permitivitas vakum. Disebut juga konstanta dielektrik relatif atau permitivitas relatif.
- Persen Berat (wt%)**: Spesifikasi konsentrasi dalam bentuk satuan berat atau massa untuk unsur tertentu relatif terhadap berat (atau massa) total paduan.
- Satuan Massa Atom**: Ukuran massa atom yang dihitung dari 1/12 bagian massa atom C^{12} .
- Sel Unit** : Satuan struktur dasar sebuah struktur kristal. Sel unit menggambarkan posisi atom atau ion dalam ruang tiga dimensi.
- Supekonduktor tipe 1**: Jenis superkonduktor yang dapat kehilangan dengan mudah sifat superkonduktivitasnya bila terkena medan magnetik luar yang melebihi medan magnetik kritisnya. Superkonduktor tipe ini dikenal juga sebagai superkonduktor lemah.
- Superkonduktor Tipe 2**: Jenis superkonduktor ini lebih sulit kehilangan sifat superkonduktivitasnya dalam medan magnet, namun sifat superkonduktivitasnya tetap akan menurun.

Temperatur Curie: Batas temperatur pada bahan feromagnetik atau ferimagnetik menjadi paramagnetik.

Temperatur Leleh: Temperatur saat pemanasan dimana benda berubah fasa dari padat menjadi cair.

DAFTAR PUSTAKA

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Dekker, A. J. (1959). Electrical engineering materials. Prentice Hall.
- Jain, G. C. (1967). Properties of electrical engineering materials.
- Listrik, B. P. U. I. (2011). Standar Nasional Indonesia. SNI, 225, 2011.
- Martinez-Vega, J. (Ed.). (2013). Dielectric materials for electrical engineering. John Wiley & Sons.
- Poole, C. K., Farach, H. A., & Creswick, R. J. (1999). Handbook of superconductivity. Elsevier.
- Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
- Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)

Program Studi	: Teknik Elektro S-1	Sks	: 2 Sks
Mata Kuliah/Kode	: Ilmu Bahan Listrik / TEL0152	Prasyarat	: --
Semester	: 3	Kurikulum	: KKNi
Deskripsi Mata Kuliah	: Mata Kuliah Ilmu Bahan Listrik merupakan mata kuliah yang mempelajari mengenai bahan dan karakteristiknya. Setiap Bahan tersusun atas atom dan molekul. Bahan memiliki karakteristik termal yang terkait perilaku bahan terhadap temperatur dan panas, karakteristik mekanik yang terkait dengan ketahanan terhadap beban mekanis, dan karakteristik elektrik yang terkait dengan kemampuan bahan menghantarkan arus listrik.	Capaian Pembelajaran	: Setelah mempelajari mata kuliah ini mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan tentang: struktur atom dan molekul sebagai penyusun bahan, karakteristik mekanik termal dan listrik serta aplikasi dari bahan isolator, dielektrik, konduktor, magnetik, semikonduktor, dan superkonduktor.
Penyusun	: 1. Dr. Jan Setiawan, S.Si, M.Si. (Ketua); 2. Mardiansyah, S.T., M.Kom. (Anggota 1); 3. Ariyawan Sunardi, S.Si., M.T. (Anggota 2); 4. Heri Kusnadi, S.T., M.T. (Anggota 3).		

PERTEMUAN KE-	KEMAMPUAN AKHIR YANG DIHARAPKAN	BAHAN KAJIAN (MATERI AJAR)	METODE PEMBELAJARAN	PENGALAMAN BELAJAR MAHASISWA	KRITERIA PENILAIAN	BOBOT NILAI
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	Mampu menjelaskan definisi atom, model atom, ikatan atom, molekul dan klasifikasi struktur kristal dan klasifikasi bahan berdasarkan fasa dan sifat kelistrikannya	Klasifikasi bahan, atom, model atom, struktur atom dan ikatan atom dan molekul dan struktur kristal pada bahan	Demonstrasi dan simulasi	Latihan 1	Kelengkapan jawaban	7%
2	Memahami jenis beserta karakteristik kelistrikan bahan isolasi padat, resistivitas, permitivitas dan dielektrik loss.	Bahan isolasi dan isolator padat	Demonstrasi dan simulasi	Latihan 2	Kelengkapan jawaban	7%
3	Memahami jenis dan karakteristik kelistrikan bahan isolasi cair	Penemuan, penggunaan, jenis bahan isolasi cair	Demonstrasi dan simulasi	Latihan 3	Kelengkapan jawaban	7%
4	Memahami jenis dan karakteristik kelistrikan bahan isolasi gas	Bahan isolasi gas	Demonstrasi dan simulasi	Latihan 4	Kelengkapan jawaban	7%
5	Memahami struktur atom dan molekul serta menjelaskan	Isolator polimer, jenis polimerisasi, kategori dan	Demonstrasi dan simulasi	Latihan 5	Kelengkapan jawaban	7%

	karakteristik bahan polimer	kelompok polimer				
6	Memahami struktur atom dan molekul, dan karakteristik bahan keramik, bahan dielektrik dan karakteristik kelistrikannya	Isolator keramik, bahan tambang keramik dan kebocoran pada isolator keramik	Demonstrasi dan simulasi	Latihan 6	Kelengkapan jawaban	7%
7	Memahami struktur atom dan molekul, dan karakteristik bahan komposit	Bahan komposit dan jenis-jenis komposit	Demonstrasi dan simulasi	Tugas 1	Kelengkapan jawaban	8%
UTS						
8	Memahami struktur atom dan molekul dan karakteristik kelistrikan bahan logam	Struktur kristal dan densitas teoritis dan karakteristik isolator logam	Demonstrasi dan simulasi	Tugas 2	Kelengkapan jawaban	7%
9	Memahami jenis dan bagaimana mekanisme hantaran arus listrik pada bahan konduktor	Bahan konduktor dan klasifikasinya, kriteria mutu penghantar	Demonstrasi dan simulasi	Tugas 3	Kelengkapan jawaban	7%
10	Memahami jenis dan sifat-sifat kemagnetan pada bahan magnetik	Bahan magnetik, diamagnetik, paramagnetik, feromagnetik, ferimagnetik dan antiferomagnetik	Demonstrasi dan simulasi	Tugas 4	Kelengkapan jawaban	7%

11	Memahami karakteristik kelistrikan bahan magnetik	Bahan magnet dan sifat listrik, teori weiss dan heisenberg	Demonstrasi dan simulasi	Tugas 5	Kelengkapan jawaban	7%
12	Memahami bahan semikonduktor dan teknik pembentukan perangkat semikonduktor	Bahan semikonduktor, struktur kristal	Demonstrasi dan simulasi	Tugas 6	Kelengkapan jawaban	7%
13	Memahami karakteristik kelistrikan bahan semikonduktor	Karakteristik kelistrikan dan efek iradiasi bahan semikonduktor, elektroda semikonduktor	Demonstrasi dan simulasi	Tugas 7	Kelengkapan jawaban	7%
14.	Memahami jenis dan karakteristik kelistrikan bahan superkonduktor	Bahan superkonduktor dan implementasinya, jenis-jenis superkonduktor	Demonstrasi dan simulasi	Tugas 8	Kelengkapan jawaban	8%
UAS						

Referensi:

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley.
- Dekker, A. J. (1959). Electrical engineering materials. Prentice Hall.
- Jain, G. C. (1967). Properties of electrical engineering materials.

Listrik, B. P. U. I. (2011). Standar Nasional Indonesia. SNI, 225, 2011.
Martinez-Vega, J. (Ed.). (2013). Dielectric materials for electrical engineering. John Wiley & Sons.
Poole, C. K., Farach, H. A., & Creswick, R. J. (1999). Handbook of superconductivity. Elsevier.
Seth, Swinder Parkash, (1981), A Course in Electrical Engineering Material, Dhanpat Rai & Sons, New Delhi
Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). Modern physical metallurgy and materials engineering. Butterworth-Heinemann.
Van Vlack, L. H. (2004). Elemen–Elemen Ilmu dan Rekayasa Material. Alih bahasa: Sriati Djaprie), Jakarta, Erlangga.

Ketua Program Studi
S1 Teknik Elektro

Pamulang, 24 Februari 2022
Ketua Tim Teaching
Mata Kuliah Ilmu Bahan Listrik

Ariyawan Sunardi, S.Si., M.T
NIDN. 0410108208

Dr. Jan Setiawan, S.Si, M.Si.
NIDN. 8874700016