



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN  
RISET DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS MULAWARMAN

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

Jalan Barong Tongkok No. 4 Kampus Gunung Kelua, Samarinda – Kalimantan Timur 75123 Indonesia  
Telp./Fax: 0541-77974, Email:

**SURAT TUGAS**

Nomor : 2975 /UN17.7/PP/2022

Yang bertanda tangan di bawah ini Wakil Dekan Bidang Umum dan Keuangan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Mulawarman, dengan ini menugaskan :

| No | Nama                               | NIP                | Email                       |
|----|------------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| 1  | Dr. Dadan Hamdani, M.Si            | 197302232000121001 | d.hamdani1973@gmail.com     |
| 2  | Dr. Rahmawati M, M.Si              | 198012012006042001 | rahmawati@fmipa.unmul.ac.id |
| 3  | Dr. Adrianus Inu Natalis anto M.Si | 197012252000121002 | adrianus.inu@gmail.com      |

Untuk mengikuti Kegiatan Applied Approach (AA) yang diselenggarakan LP3M pada hari Senin - Rabu tanggal 28 s/d 30 November 2022 jam 08.00 - 16.00 Wita di Gedung Bundar Fakultas Kehutanan Universitas Mulawarman.

Demikian surat tugas ini diberikan untuk dapat dilaksanakan sebaik-baiknya, atas perhatiannya diucapkan terima kasih.



Samarinda, 29 November 2022

a.n. Dekan

Wakil Dekan Bidang Umum dan Keuangan,

Dr. Yanti Puspita Sari, M.Si

NIP 19740304200012 2 001

# LAPORAN TUGAS

## PELATIHAN APPLIED APPROACH (AA)

(28 – 30 November 2022)

(Rekonstruksi Mata Kuliah: CPL Prodi, CPL MK, CPMK,  
Peta Capaian, dan RPS)



Nama : Dr. Dadan Hamdani, S.Si., M.Si.  
NIDN : 0023027301

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS MULAWARMAN  
TAHUN 2022

# DAFTAR ISI

|  |  |
|--|--|
| DAFTAR ISI .....   |  |
| KATA PENGANTAR.....  |  |
| RENCANA REKONSTRUKSI MATA KULIAH (CPL PRODI, CPL MATA KULIAH, CPMK, CPMK, PETA PEMBELAJARAN, RPS)..... |  |
| HASIL REKONSTRUKSI MATA KULIAH .....   |  |
| RANCANGAN EVALUASI PROGRAM PEMBELAJARAN .....  |  |
| EVALUASI ALTERNATIF.....   |  |
| BAHAN AJAR.....  |  |
| CHECK LIST LEMBAR KONSULTASI.....  |  |
| DOKUMEN YANG DIREKONSTRUKSI.....   |  |

## KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga Laporan Tugas Applied Approach (AA) yang diadakan sejak tanggal 28 – 30 November 2022 oleh LP3M Universitas Mulawarman dapat diselesaikan. Laporan *Applied Approach* (AA) ini berisi a) hasil Rekonstruksi Mata Kuliah berupa: CPL Program Studi, CPL Mata Kuliah, CPMK, Peta Capaian, RPS, RPP, Rencana Asesmen dan Evaluasi (RA & E), Contoh Tes Uraian, Jawaban, dan Pedoman Penskoran Soal Uraian, b) Rancangan Evaluasi Program Pembelajaran, c) Evaluasi Alternatif, d) Bahan Ajar. dan e) Check List Lembar Konsultasi.

Penyelesaian Laporan AA ini banyak menerima arahan, masukan, dan bimbingan dari LP3M Universitas Mulawarman, khususnya kepada Para Instruktur Pelatihan Kegiatan AA, Panitia, dan pihak-pihak lain yang telah mendukung sehingga Laporan AA ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ketua LP3M Universitas Mulawarman, Prof. Dr. Lambang Subagiyo, M.Si, yang telah menyelenggarakan pelatihan *Applied Approach* (AA) tahun 2022;
2. Kapuslatbangdik LP3M, Dr. Sudarman, S.Pd., M.Pd. yang telah memberikan kesempatan kepada penulis sehingga terpilih mengikuti pelatihan *Applied Approach* (AA) tahun 2022;
3. Pembimbing pelatihan AA, Ibu Dr. Ir. Isna Yuniar Wardhani, MP yang telah memberikan masukan serta menyediakan waktu untuk berdiskusi tentang materi pelatihan AA;
4. Para instruktur dalam kegiatan Pelatihan AA 2022 yang telah menyampaikan materi pelatihan AA tahun 2022;
5. Dekan FMIPA Universitas Mulawarman, Dr. Eng. Idris Mandang, M.Si., Ketua Jurusan Fisika, Dr. Djayus, MT., Koordinator Program Studi Fisika, Dr. Rahmawati Munir, S.Si., M.Si. yang telah memberikan kesempatan kepada penulis guna mengikuti kegiatan pelatihan AA.

Harapannya semoga penulisan Laporan AA ini dapat membeikan rmanfaat bagi penulis khususnya dan banyak pihak pada umumnya. Tidak ada kata sempurna, hanya milik Allah SWT semata kesempurnaan, sehingga disadari bahwa dalam penulisan Laporan AA ini masih ditemukan kesalahan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk dapat meningkatkan mutu dan kualitas pembelajaran khususnya untuk mata kuliah Fisika Zat Padat.

Samarinda, Desember 2022

Dr. Dadan Hamdani, S.Si., M.Si.  
NIP. 19730223 200012 1 001

## LEMBAR PENGESAHAN

Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
Kode Mata Kuliah : 190704603W034  
SKS : 3 (Tiga)  
Semester : VI (Enam)  
Program Studi : Fisika  
Jurusan : Fisika  
Institusi : Universitas Mulawarman  
Dosen : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si  
Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si.  
NIDN : 0023027301  
NIP : 19730223 200012 1 001

Pembimbing,

Samarinda, Desember 2022  
Peserta,

Dr. Ir. Isna Yuniar Wardhani, MP.  
NIP. 19630617 199002 2 001

Dr. Dadan Hamdani, S.Si., M.Si.  
NIP. 19730223 200012 1 001

Mengetahui,  
Kapuslatbangdik-LP3M Unmul

Dr. Sudarman, S.Pd., M.Pd  
NIP. 197202152005011002

# 1. RENCANA REKONSTRUKSI MATA KULIAH (CPL PRODI, CPL MATA KULIAH, CPMK, PETA CAPAIAN, RPS)

Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
 Jurusan : Fisika  
 Program Studi : Fisika  
 Semester/SKS : VI (Enam)/3 SKS  
 Dosen : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si  
           Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si.  
 Tahun Akademik : Genap 2022/2023

| No. | Uraian Point – point yang Dievaluasi               | Uraian Evaluasi   | Rencana Rekonstruksi   |
|-----|--|---|--|
| 1   | CPL Program Studi yang dibebankan pada Mata Kuliah | CPL Program Studi Fisika belum sesuai dengan CPL yang terdapat dalam kurikulum Program Studi Fisika hasil AMI Tahun 2022                    | CPL Program Studi Fisika disesuaikan dengan CPL yang terdapat dalam kurikulum Program Studi Fisika hasil AMI Tahun 2022                  |
| 2   | Capaian Pembelajaran Mata Kuliah                   | Tidak dituliskan Capaian Pembelajaran Mata Kuliah Fisika Zat Padat  | Menuliskan Capaian Pembelajaran Mata Kuliah Fisika Zat Padat   |
| 3   | Sub CPMK   | Sub CPMK untuk setiap pertemuan tidak sesuai dengan perkembangan dan perubahan IPTEK di bidang material                                     | Sub CPMK untuk setiap pertemuan diganti dengan Sub CPMK baru yang sesuai dengan perkembangan dan perubahan IPTEK di bidang material      |
| 4   | Analisis Capaian Pembelajaran                      | Peta Capaian Pembelajaran belum dituliskan  | Menuliskan Peta Capaian Pembelajaran   |
| 5   | Format Rencana Pembelajaran Semester (RPS)         | Format Rencana Pembelajaran Semester (RPS) belum sesuai dengan Format yang diberikan oleh LP3M Unmul  | Format Rencana Pembelajaran Semester (RPS) disesuaikan dengan Format yang diberikan oleh LP3M Unmul                                      |
| 6   | Indikator  | Indikator untuk setiap pertemuan masih mengikuti Sub CPMK lama yang tidak sesuai dengan perkembangan dan perubahan IPTEK di bidang material | Indikator untuk setiap pertemuan disesuaikan dengan Sub CPMK baru yang sesuai dengan perkembangan dan perubahan IPTEK di bidang material |
| 7   | Materi Ajar (Bahan Kajian)                         | Materi Ajar untuk setiap pertemuan masih mengikuti indikator dan Sub CPMK lama yang tidak sesuai dengan                                     | Materi Ajar untuk setiap pertemuan disesuaikan dengan indikator dan Sub CPMK baru yang sesuai dengan                                     |

| No. | Uraian Point – point yang Dievaluasi | Uraian Evaluasi   | Rencana Rekonstruksi  |
|-----|--------------------------------------|---|---|
|     |                                      | perkembangan dan perubahan IPTEK di bidang material   | perkembangan dan perubahan IPTEK di bidang material   |
| 8   | Model pembelajaran                   | Model pembelajaran yang digunakan (Model TTW) tidak sesuai dengan yang dituntut dalam IAPS 4.0  | Menggantikan model pembelajaran TTW dengan pendekatan PBL ( <i>Project Based Learning</i> ) untuk pertemuan 10 dan 11, sedangkan pertemuan lainnya digunakan model pembelajaran <i>Direct Instruction</i> |
| 9   | Pengalaman belajar mahasiswa         | Kalimat dalam pengalaman belajar mahasiswa <ul style="list-style-type: none"> <li>Mendengarkan penjelasan dosen</li> </ul> Bukan kalimat pengalaman belajar | Kalimat dalam pengalaman belajar mahasiswa <ul style="list-style-type: none"> <li>Mendengarkan penjelasan dosen</li> </ul> dihapus  |
| 10  | Penilaian                            | Tidak ada jenis Penilaian   | Ditambahkan jenis penilaian   |
| 11  | Bobot penilaian                      | Bobot penilaian melebihi 100%   | Menentukan bobot penilaiannya 100%  |
| 12  | Referensi                            | Buku referensi yang digunakan sudah lama melebihi 10 tahun  | Memperbaharui buku referensi yang digunakan sebelumnya dengan buku referensi terbaru, kecuali buku utama  |

**TABEL REKAPITULASI RENCANA REKONSTRUKSI  
MATA KULIAH FISIKA ZAT PADAT**

| No. | Bagian yang Direkonstruksi                         | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi  |   |
|-----|--|--|---|
|     |  | Sebelum Rekonstruksi   | Setelah Rekonstruksi  |
| 1   | CPL Program Studi yang dibebankan pada Mata Kuliah | <p><b>Sikap:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Bertakwa kepada Tuhan Yang Maha Esa dan mampu menunjukkan sikap religious. (RS1)</li> <li>Menginternalisasi nilai, norma dan etika akademik. (RS3)</li> <li>Menunjukkan sikap profesionalisme atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri. (RS10)</li> </ol>                           | -   |
|     |  | <p><b>Penguasaan Pengetahuan:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Menguasai konsep teoritis dan prinsip-prinsip pokok Termodinamika dan Fisika Modern sederhana yang berhubungan dengan zat padat, dan terdefinisi dengan baik. (PP1)</li> </ol>  | <p><b>Penguasaan Pengetahuan:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Menguasai konsep teoritis dan azas-azas pokok fisika klasik dan fisika modern untuk pemecahan masalah suatu sistem fisis (PLO10)</li> <li>Mampu mengaplikasikan konsep-konsep dan azas-azas pokok fisika serta teknologi pada bidang keahlian tertentu, seperti: fisika teori, fisika material, fisika elektronika dan instrumentasi, fisika medik, geofisika dan oseanografi fisis (PLO11)</li> </ol> |
|     |  | <p><b>Keterampilan Umum</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan/atau teknologi sesuai bidang keahliannya. (KU1)</li> <li>Mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi</li> </ol> | <p><b>Keterampilan Umum:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif untuk pengambilan keputusan dalam pekerjaannya, dalam konteks implementasi ilmu pengetahuan dan/atau teknologi (PLO4)</li> <li>Mampu menerapkan kaidah, tata cara dan etika</li> </ol>   |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi       | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi  |  |
|-----|----------------------------------|--|--|
|     |                                  | Sebelum Rekonstruksi   | Setelah Rekonstruksi   |
|     |                                  | <p>bidang Fisika Zat Padat berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah untuk menghasilkan solusi, gagasan, desain, atau kritik seni serta menyusun deskripsi saintifik hasil kajiannya dalam bentuk skripsi atau laporan tugas akhir. (KU2)</p> <p>3. Mengambil keputusan secara tepat dalam konteks penyelesaian masalah di bidang Fisika Zat Padat, berdasarkan hasil analisis terhadap informasi dan data yang diperoleh. (KU3)</p>                                  | <p>ilmiah dalam bentuk skripsi dan karya tulis ilmiah, untuk implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi (PLO5)</p>  |
|     |                                  | <p><b>Keterampilan Khusus</b></p> <p>1. Mampu merumuskan gejala dan masalah dasar Fisika Zat Padat melalui analisis teoritik dan eksperimen. (KK1)</p> <p>2. Mampu menghasilkan model fisis yang sesuai dengan hipotesis atau prakiraan dampak dari fenomena yang menjadi subyek pembahasan dalam bidang Fisika Zat Padat. (KK2)</p> <p>3. Menghasilkan karya ilmiah sains dalam bidang Fisika Zat Padat dan aplikasinya terkait pengelolaan hutan hujan tropis. (KK7)</p> | <p><b>Keterampilan Khusus :</b></p> <p>Mampu menganalisis berbagai persoalan fisis untuk menemukan solusi alternatif secara analitik maupun (PLO8)</p>                           |
| 2   | Capaian Pembelajaran Mata Kuliah | Tidak dituliskan Capaian Pembelajaran Mata Kuliah Fisika Zat Padat   | <p>Dituliskan Capaian Pembelajaran Mata Kuliah Fisika Zat Padat:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat</li> </ul> |
| 3   | Analisis Capaian Pembelajaran    | <b>Analisis Capaian Pembelajaran:</b><br>Peta capaian pembelajaran belum didesign  | <b>Analisis Capaian Pembelajaran:</b><br>Didesign Peta capaian pembelajaran  |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi         | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi  |   |
|-----|------------------------------------|--|---|
|     |                                    | Sebelum Rekonstruksi   | Setelah Rekonstruksi  |
| 4   | Sub CPMK/Indikator/<br>Materi Ajar | <p><b>Pertemuan 1</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa harus dapat memiliki wawasan dan pengetahuan tentang ruang lingkup materi fisika zat padat</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan batasan fisika zat padat</li> <li>• Mampu menjelaskan kedudukan fisika zat padat dalam ilmu fisika</li> <li>• Mampu menjelaskan pendekatan yang digunakan dalam fisika zat padat.</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pengantar fisika zat padat</li> <li>• Kedudukan fisika zat padat dalam ilmu fisika</li> <li>• Pendekatan yang digunakan dalam fisika zat padat</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 1</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menyampaikan kontrak perkuliahan</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan struktur kristal dan sel satuan</li> <li>• Memahami operasi simetri</li> <li>• Mengidentifikasi tipe-tipe kristal</li> <li>• Menjelaskan arah kisi dan bidang kristal</li> <li>• Memahami grup titik dan ruang kristal</li> <li>• Membedakan struktur kristal tertentu</li> <li>• Memahami kuasi-kristal</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dasar-dasar struktur kristal</li> <li>• Sel satuan: struktur sel primitive</li> <li>• Operasi simetri</li> <li>• Tipe-tipe kristal</li> <li>• Arah kisi dan bidang kisi</li> <li>• Grup titik dan ruang kristal</li> <li>• Struktur kristal tertentu</li> <li>• Kuasi kristal</li> </ul> |
|     |                                    | <p><b>Pertemuan 2</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa harus dapat mengingat Kembali konsep - konsep termodinamika yang</li> </ul>  | <p><b>Pertemuan 2</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami tentang konsep Ikatan kristal</li> </ul>   |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi   |   |
|-----|----------------------------|---|---|
|     |                            | Sebelum Rekonstruksi  | Setelah Rekonstruksi  |
|     |                            | <p>berhubungan dengan fisika zat padat</p> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan hukum-hukum termodinamika</li> <li>• Mampu menjelaskan besaran terukur dari suatu sistem ditinjau melalui persamaan-persamaan termodinamika</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pengertian dasar termodinamika</li> <li>• Persamaan keadaan</li> <li>• Hukum-hukum</li> <li>• Energi bebas</li> </ul>       | <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan kohesi atom</li> <li>• Membedakan ikatan atom utama dan sekunder</li> <li>• Menjelaskan energi kohesif</li> <li>• Memperkirakan konstanta elastik kristal</li> </ul> <p>Menjabarkan gelombang elastic pada kristal kubik</p> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kohesi atom</li> <li>• Ikatan atom utama</li> <li>• Ikatan atom sekunder</li> <li>• Energi kohesif</li> <li>• Konstanta elastik kristal</li> <li>• Gelombang elastik pada kristal kubik</li> </ul> |
|     |                            | <p><b>Pertemuan 3</b></p> <p><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa harus dapat memahami keteraturan struktur Kristal zat padat.</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu mendefinisikan struktur kristal</li> <li>• Mampu menjelaskan secara umum mengenai kisi Kristal, basis, dan sel satuan</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Struktur Kristal</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 3</b></p> <p><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu menginterpretasikan tentang konsep kisi resiprok dan penentuan striuktur kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami kisi resiprok</li> <li>• Menjelaskan hukum Bragg</li> <li>• Menjelaskan Hubungan antara <b>a, b, c</b> dengan <b>a*, b*, c*</b></li> </ul>  |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi   |   |
|-----|----------------------------|---|---|
|     |                            | Sebelum Rekonstruksi  | Setelah Rekonstruksi  |
|     |                            |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menginterpretasikan pengukuran pola difraksi kristal</li> <li>• Memperkirakan konstanta kisi</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kisi resiprok</li> <li>• Hukum Bragg</li> <li>• Konstruksi kisi resiprok</li> <li>• Hubungan antara <b>a, b, c</b> dengan <b>a*, b*, c*</b></li> <li>• Pengukuran pola difraksi kristal</li> <li>• Penentuan konstanta kisi</li> </ul>   |
|     |                            | <p><b>Pertemuan 4</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa diharapkan dapat memiliki wawasan dan pengetahuan tentang kisi kristal, bidang kristal dan indeks miller</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan kisi Kristal serta kesimetrisannya</li> <li>• Mampu menjelaskan bidang kristal dan indeks miller</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kisi Kristal</li> <li>• Indeks Miller</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 4</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami tentang konsep vibrasi kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami model harmonik kristal</li> <li>• Menjelaskan mode normal rantai monoatomik dan diatomik 1D</li> <li>• Memahami kuantisasi vibrasi kisi</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Model harmonik kristal</li> <li>• Mode normal rantai monoatomik 1D</li> <li>• Mode normal rantai diatomik 1D</li> <li>• Teori umum pendekatan harmonic</li> </ul> |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi  | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi   |   |
|-----|---|---|---|
|     |   | Sebelum Rekonstruksi  | Setelah Rekonstruksi  |
|     |   |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kuantisasi vibrasi kisi</li> </ul> |
|     | <p><b>Pertemuan 5</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa dapat mengetahui tentang ketidaksempurnaan yang ada pada kristal atau cacat Kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu memahami berbagai keadaan fisik pada kristal</li> <li>• Mampu menganalisis berbagai jenis cacat (defect) pada Kristal</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cacat titik</li> <li>• Cacat garis</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 5</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Membedakan kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik dan kuantum</li> <li>• Memahami efek tak-harmonik</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik</li> <li>• Kapasitas panas berdasarkan tinjauan kuantum</li> <li>• Efek tak-harmonik (un-harmonic)</li> </ul> |   |
|     | <p><b>Pertemuan 6</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu Memahami konsep energi entaraksi dan menjelaskan gaya-gaya antar atom dalam berbagai struktur kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan energy entraksi dan gaya-gaya antar atom</li> <li>• Mampu menjelaskan munculnya gaya Coulomb</li> <li>• Mampu menjelaskan gaya Tarik menarik yang menimbulkan berbagai jenis ikatan</li> </ul>                 | <p><b>Pertemuan 6</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami tentang teori elektron bebas pada logam</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami dan menjelaskan model Drude</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>• Memahami dan menerapkan Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Model Sommerfeld</li> </ul>   |   |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi  |   |
|-----|----------------------------|--|---|
|     |                            | Sebelum Rekonstruksi   | Setelah Rekonstruksi  |
|     |                            | <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energi entraksi</li> <li>• Gaya antar atom</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami kapasitas panas elektron</li> <li>• Menerapkan teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Aturan Matthiessen</li> <li>• Mengidentifikasi bahan termoelektrik</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Model Drude</li> <li>• Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>• Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>• Model Sommerfeld</li> <li>• Kapasitas panas elektron</li> <li>• Teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>• Aturan Matthiessen</li> <li>• Bahan termoelektrik</li> </ul> |
|     |                            | <p><b>Pertemuan 7</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu menjabarkan tentang hamburan gelombang oleh struktur Kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan fenomena hamburan</li> <li>• Mampu menjelaskan tentang hukum Bragg</li> <li>• Mampu membedakan berbagai jenis</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 7</b><br/><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami konsep pita energi elektron</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami Konsekuensi dari periodisitas</li> <li>• Mengintrepretasikan gelombang mekanik dalam</li> </ul>  |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi  |  |
|-----|----------------------------|--|--|
|     |                            | Sebelum Rekonstruksi   | Setelah Rekonstruksi   |
|     |                            | <p>hamburan</p> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hamburan gelombang oleh struktur Kristal</li> <li>• Hukum Bragg</li> </ul>   | <p>pita energi</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan model Kronig-Penney</li> <li>• Menjelaskan model elektron hampir bebas</li> <li>• Memahami skema zona pita energi</li> <li>• Menjelaskan Pita energi dalam potensial periodik</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsekuensi dari periodisitas</li> <li>• Interpretasi gelombang mekanik dalam pita energi</li> <li>• Model Kronig-Penney</li> <li>• Model elektron hampir bebas</li> <li>• Skema zona pita energi</li> <li>• Pita energi dalam potensial periodic</li> <li>• Isolator, semikonduktor dan konduktor</li> </ul> |
|     |                            | <p><b>Pertemuan 9</b></p> <p><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu menjabarkan masalah kisi resiprok dan difraksi sinar X</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjabarkan tentang kisi resiprok</li> <li>• Mampu menjelaskan kaitan kisi resiprok dan difraksi sinar X</li> <li>• Hubungan antara kisi resiprok dan bidang Kristal dari kisi nyata</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 9</b></p> <p><b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami konsep hole dan massa efektif</li> <li>• Menjabarkan konstruksi permukaan Fermi</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Elektron dalam medan magnet seragam</li> </ul>   |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi  |   |
|-----|----------------------------|--|---|
|     |                            | Sebelum Rekonstruksi   | Setelah Rekonstruksi  |
|     |                            | <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Difraksi Sinar X pada struktur kristal</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan resonansi siklotron</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsep hole</li> <li>• Massa efektif</li> <li>• Konstruksi permukaan Fermi</li> <li>• Elektron dalam medan magnet seragam</li> <li>• Resonansi siklotron</li> </ul>   |
|     |                            | <p><b>Pertemuan 10</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami tentang getaran termal pada kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu mendefinisikan getaran termal pada kristal</li> <li>• Memahami konsep teori kinetik gas</li> <li>• Mampu menjabarkan Hukum Dulong dan petit dalam peristiwa getaran termal Kristal</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Getaran termal Kristal</li> <li>• Hukum Dulong</li> <li>• Petit</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 10</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami dan mengklasifikasikan pengelompokan semikonduktor</li> <li>• Memahami dan menjabarkan struktur pita energi</li> <li>• Menjelaskan rapat pembawa muatan intrinsik</li> <li>• Menjelaskan dan menentukan semikonduktor ekstrinsik</li> <li>• Memprediksi Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pengelompokan semikonduktor</li> <li>• Struktur pita energi</li> <li>• Rapat pembawa muatan intrinsik</li> </ul> |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi   | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi   |   |
|-----|--|---|---|
|     |  | Sebelum Rekonstruksi  | Setelah Rekonstruksi  |
|     |  |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Semikonduktor ekstrinsik</li> <li>• Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul> |
|     | <p><b>Pertemuan 11</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami dengan baik teori panas jenis kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu membedakan panas jenis Kristal menurut teori Einstein dan panas jenis Kristal menurut Debye</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Getaran Termal Kristal</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 11</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memprediksi rapat pembawa muatan ekstrinsik</li> <li>• Menjelaskan Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur</li> <li>• Memahami efek Hall</li> <li>• Menjelaskan sambungan p-n</li> <li>• Menjabarkan efek termoelektrik</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapat pembawa muatan ekstrinsik</li> <li>• Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur</li> <li>• Efek Hall</li> <li>• Sambungan p-n</li> <li>• Efek termoelektrik</li> </ul> |   |
|     | <p><b>Pertemuan 12</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu menjabarkan masalah dinamika pada kisi kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p>   | <p><b>Pertemuan 12</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p>   |   |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi  |  |
|-----|----------------------------|--|--|
|     |                            | Sebelum Rekonstruksi   | Setelah Rekonstruksi   |
|     |                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu Menjelaskan dinamika kisi Kristal pada Kristal linier mono-atomik</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dinamika Kisi Kristal</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>• Mengklasifikasikan tipe - tipe kemagnetan bahan</li> <li>• Membedakan sifat Ferromagnetisme, Anti-ferromagnetisme, dan Ferrimagnetisme</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>• Tipe-tipe kemagnetan bahan</li> <li>• Diamagnetisme</li> <li>• Paramagnetisme</li> </ul>   |
|     |                            | <p><b>Pertemuan 13</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu menjabarkan masalah dinamika pada kisi kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu Menjelaskan dinamika kisi Kristal diatomik</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dinamika kisi Kristal</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 13</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami konsep polarisasi</li> <li>• Memperkirakan konstanta dielektrik</li> <li>• Menjelaskan pengaruh medan listrik lokal</li> <li>• Memahami polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>• Mengidentifikasi rugi-rugi dielektrik</li> <li>• Menjelaskan fenomena optik</li> <li>• Memahami aplikasi plasma</li> <li>• Memahami mode fonon pada kristal ionik</li> </ul> |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi   |  |
|-----|----------------------------|---|--|
|     |                            | Sebelum Rekonstruksi  | Setelah Rekonstruksi   |
|     |                            |   | <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polarisasi</li> <li>• Konstanta dielektrik</li> <li>• Medan listrik lokal</li> <li>• Polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>• Rugi-rugi dielektrik</li> <li>• Fenomena optic</li> <li>• Aplikasi Plasma</li> <li>• Aplikasi mode fonon pada kristal ionik</li> </ul>  |
|     |                            | <p><b>Pertemuan 14</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu menjelaskan dengan baik tentang Pita energy pada kristal</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menganalisis dan menjelaskan mengenai Teorema Bloch</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teori pita energi</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 14</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu menjabarkan konsep superkonduktivitas</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan sejarah perkembangan superkonduktivitas</li> <li>• Memahami resistivitas listrik</li> <li>• Memahami efek Meissner</li> <li>• Memahami Arus-super dan kedalaman penetrasi</li> <li>• Mengklasifikasikan Superkonduktor tipe I dan II</li> <li>• Memahami Sifat termodinamik dan optik</li> <li>• Menjelaskan efek isotop dan Josephson</li> </ul> |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi  |   |
|-----|----------------------------|--|---|
|     |                            | Sebelum Rekonstruksi   | Setelah Rekonstruksi  |
|     |                            |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami teori BCS</li> <li>• Memberi contoh aplikasi superkonduktor</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendahuluan dan sejarah perkembangan</li> <li>• Resistivitas listrik</li> <li>• Efek Meissner</li> <li>• Arus-super dan kedalaman penetrasi</li> <li>• Superkonduktor tipe I dan II</li> <li>• Sifat termodinamik dan optik</li> <li>• Efek isotop</li> <li>• Efek Josephson</li> <li>• Teori BCS</li> <li>• Aplikasi</li> </ul> |
|     |                            | <p><b>Pertemuan 15</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu menjabarkan model Kronig-Penney</li> <li>• Mahasiswa memiliki gambaran mengenai peran fisika khususnya zat padat dalam pengelolaan dan pelstarian hutan hujan tropis</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan potensi energy pita energy</li> <li>• Mampu memahami dan menjabarkan perilaku</li> </ul> | <p><b>Pertemuan 15</b><br/> <b>Sub CPMK:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami konsep Nano-Material</li> </ul> <p><b>Indikator:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami pengertian nano-partikel dan nano-struktur</li> <li>• Menjelaskan dan menggambarkan sifat silikon berporos</li> <li>• Menjabarkan teknik fabrikasi</li> </ul>   |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi                 | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi   |  |
|-----|--|---|--|
|     |  | Sebelum Rekonstruksi  | Setelah Rekonstruksi   |
|     |  | <p>electron melalui model Kronig-penney</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu melahirkan ide atau gambaran pengelolaan hutan hujan tropis dalam kaitannya dengan fisika zat padat</li> </ul> <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teori Pita Energi</li> <li>• Pengelolaan hutanhujan tropis</li> <li>• Pengembangan ide fisika zat padat untuk pelestarian hutan hujan tropis</li> </ul> | <p><b>Materi Ajar:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendahuluan</li> <li>• Nano-partikel</li> <li>• Nano-struktur</li> <li>• Silikon berporos</li> <li>• Teknik Fabrikasi</li> </ul>   |
| 5   | Format Rencana Pembelajaran Semester (RPS) | <p><b>Format Rencana Pembelajaran Semester (RPS):</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Deskripsi Mata Kuliah</li> <li>2. Capaian Pembelajaran Lulusan</li> <li>3. Isi RPS (Tabel)</li> <li>4. Daftar Referensi</li> <li>5. Skema Penilaian</li> </ol>  | <p><b>Format Rencana Pembelajaran Semester (RPS):</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Capaian Pembelajaran Lulusan Program Studi yang dibebankan pada mata kuliah</li> <li>2. Capaian Pembelajaran Mata Kuliah</li> <li>3. PIP Unmul yang di Integrasikan</li> <li>4. Deskripsi Mata Kuliah</li> <li>5. Isi RPS (Tabel)</li> <li>6. Daftar Referensi</li> <li>7. Tugas mahasiswa dan penilaiannya</li> </ol> |
| 6   | Strategi Pembelajaran                      | Pertemuan 10 dan 11 menggunakan model pembelajaran TTW  | Pertemuan 10 dan 11 menggunakan pendekatan PBL ( <i>Project Based Learning</i> )   |
|     |  | Pertemuan selain pertemuan 10 dan 11 menggunakan model pembelajaran TTW   | Pertemuan selain pertemuan 10 dan 11 menggunakan model pembelajaran <i>Direct Instruction</i>  |
| 7   | Pengalaman belajar mahasiswa               | <p><b>Pengalaman belajar mahasiswa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mendengarkan penjelasan dosen</li> </ul>  | <p><b>Pengalaman belajar mahasiswa</b></p> <p>Mendengarkan penjelasan dosen (dihapus)</p>  |
| 8   | Penilaian                                  | Tidak tertulis jenis penilaian  | Dituliskan jenis penilaian yang disesuaikan dengan karakteristik materi ajar   |

| No. | Bagian yang Direkonstruksi                       | Rekapitulasi Sebelum dan Setelah Rekonstruksi  |   |
|-----|--|--|---|
|     |  | Sebelum Rekonstruksi   | Setelah Rekonstruksi  |
| 8   | Bobot penilaian                                  | Bobot penilaian melebihi 100%  | Menentukan bobot penilaiannya 100%  |
| 9   | Referensi  | <p><b>Buku referensi:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Charles Kittel, 1953, Introduction to Solid State Physics, John Wiley, New York</li> <li>• Michael C. Martin, 1996, Solid State Physics, John Wiley, New York</li> <li>• Chrisman J. R, 1988, Fundamentals of Solid State Physics, John Wiley &amp; Son, New York</li> <li>• Nurlaela Rauf, 2008, Fisika Zat Padat, LKPP Unhas, Makassar</li> </ul> | <p><b>Buku referensi:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States</li> <li>• Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi</li> <li>• Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi</li> <li>• Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi</li> <li>• Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi</li> </ul> |
| 10  | <b>Rencana Pelaksanaan Pembelajaran (RPP)</b>    | Rencana Pelaksanaan Pembelajaran menggunakan CPMK dan Sub CPMK sebelum rekonstruksi  | Rencana Pelaksanaan Pembelajaran berubah mengikuti CPMK dan Sub CPMK hasil rekonstruksi   |
| 11  | <b>Rencana Asesmen dan Evaluasi (RA &amp; E)</b> | Rencana Asesmen dan Evaluasi menggunakan CPMK, Sub CPMK, dan RPS sebelum rekonstruksi  | Rencana Asesmen dan Evaluasi menggunakan CPMK, Sub CPMK, dan RPS hasil rekonstruksi   |
| 12  | <b>Kontrak Perkuliahan</b>                       | Kontrak perkuliahan menggunakan CPL, CPMK, Sub CPMK, dan RPS sebelum rekonstruksi  | Kontrak perkuliahan menggunakan CPL, CPMK, Sub CPMK, dan RPS hasil rekonstruksi   |
| 13  | <b>Rubrik Penilaian</b>                          | Belum terdapat rubrik penilaian  | Dituliskan rubrik penilaian   |

## 2. HASIL REKONSTRUKSI MATA KULIAH

### 2.1 Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL) Program Studi

Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
Kode Mata Kuliah : 190704603W034  
SKS : 3 (Tiga)  
Semester : VI (Enam)  
Jurusan : Fisika  
Program Studi : Fisika  
Perguruan Tinggi : Universitas Mulawarman

#### **Aspek Sikap:**

1. Menunjukkan sikap religius dan pengamalan nilai – nilai Pancasila dalam kehidupan bermasyarakat, berbangsa, dan bernegara (PLO1)
2. Menunjukkan sikap bertanggung jawab, jujur, dan secara mandiri mampu berpikir kritis, kreatif, inovatif, berjiwa enterpreneur serta bersikap professional dalam pekerjaannya (PLO2)
3. Menunjukkan kepedulian dan perilaku yang baik tentang konservasi hutan tropis lembab dan lingkungannya (PLO3)

#### **Aspek Ketrampilan Umum:**

1. Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif untuk pengambilan keputusan dalam pekerjaannya, dalam konteks implementasi ilmu pengetahuan dan/atau teknologi (PLO4)
2. Mampu menerapkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam bentuk skripsi dan karya tulis ilmiah, untuk implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi (PLO5)
3. Mampu bekerja mandiri, memperluas dan memelihara jaringan kerja untuk berkontribusi kepada masyarakat (PLO6)

#### **Aspek Ketrampilan Khusus:**

1. Mampu menerapkan metode ilmiah untuk menghasilkan model fisis secara matematis (PLO7)
2. Mampu menganalisis berbagai persoalan fisis untuk menemukan solusi alternatif secara analitik maupun (PLO8)
3. Mampu membuat karya tulis ilmiah fisika dan mendesiminasikannya, terkait dengan potensi penerapan interdisiplin dalam konteks sains, teknologi dan pengelolaan hutan tropis lembab dan lingkungannya (PLO9)

**Aspek Penguasaan Pengetahuan:**

1. Menguasai konsep teoritis dan azas-azas pokok fisika klasik dan fisika modern untuk pemecahan masalah suatu sistem fisis (PLO10)
2. Mampu mengaplikasikan konsep-konsep dan azas-azas pokok fisika serta teknologi pada bidang keahlian tertentu, seperti: fisika teori, fisika material, fisika elektronika dan instrumentasi, fisika medik, geofisika dan oseanografi fisis (PLO11)
3. Mampu menerapkan perangkat matematika dan komputasi untuk pemecahan masalah suatu sistem fisis (PLO12)
4. Mampu beradaptasi dalam mengaplikasikan bidang keahliannya secara mendalam berkaitan dengan hutan tropis lembab dan lingkungannya (PLO13)

## 2.2 Capaian Pembelajaran Lulusan pada Mata Kuliah

Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
Kode Mata Kuliah : 190704603W034  
SKS : 3 (Tiga)  
Semester : VI (Enam)  
Jurusan : Fisika  
Program Studi : Fisika  
Perguruan Tinggi : Universitas Mulawarman

### I. Capaian Pembelajaran yang dibebankan pada Mata Kuliah (CPMK):

#### 1. Aspek Sikap:

-

#### 2. Aspek Ketrampilan Umum:

1. Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif untuk pengambilan keputusan dalam pekerjaannya, dalam konteks implementasi ilmu pengetahuan dan/atau teknologi (PLO4)
2. Mampu menerapkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam bentuk skripsi dan karya tulis ilmiah, untuk implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi (PLO5)

#### 3. Aspek Ketrampilan Khusus:

1. Mampu menganalisis berbagai persoalan fisis untuk menemukan solusi alternatif secara analitik maupun (PLO8)

#### 4. Aspek Penguasaan Pengetahuan:

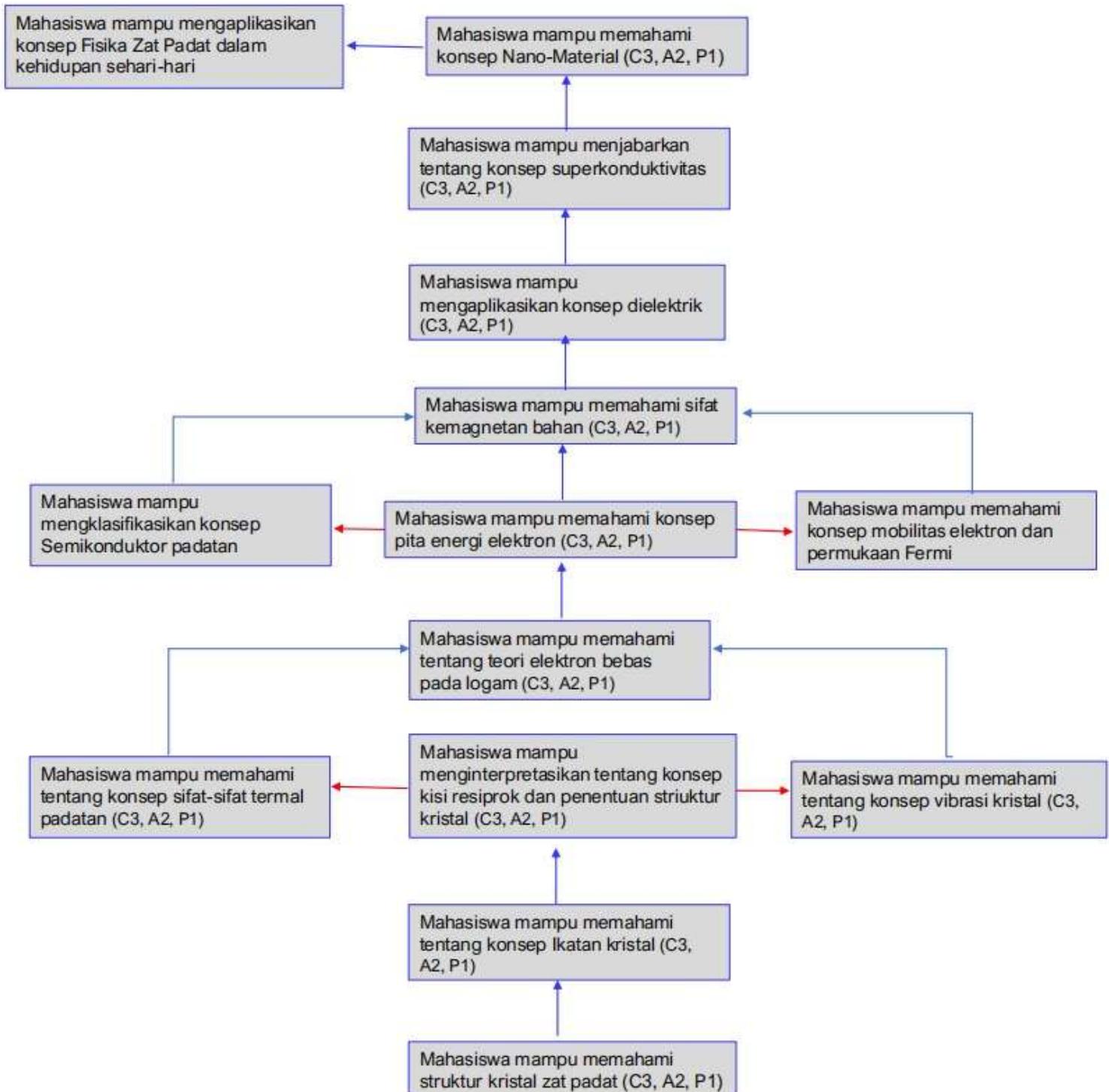
1. Menguasai konsep teoritis dan azas-azas pokok fisika klasik dan fisika modern untuk pemecahan masalah suatu sistem fisis (PLO10)
2. Mampu mengaplikasikan konsep-konsep dan azas-azas pokok fisika serta teknologi pada bidang keahlian tertentu, seperti: fisika teori, fisika material, fisika elektronika dan instrumentasi, fisika medik, geofisika dan oseanografi fisis (PLO11)

**II. Kemampuan Khusus / Sub Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (Sub CP-MK):**

| <b>No</b> | <b>Sub CP-MK/ Kemampuan Khusus</b>   |
|-----------|--|
| 1         | Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat  |
| 2         | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep Ikatan kristal   |
| 3         | Mahasiswa mampu menginterpretasikan tentang konsep kisi resiprok dan penentuan striuktur kristal |
| 4         | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep vibrasi kristal  |
| 5         | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan                               |
| 6         | Mahasiswa mampu memahami tentang teori elektron bebas pada logam                                 |
| 7         | Mahasiswa mampu memahami konsep pita energi elektron   |
| 8         | Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi                           |
| 9         | Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor  |
| 10        | Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan  |
| 11        | Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik  |
| 12        | Mahasiswa mampu menjabarkan konsep superkonduktivitas  |
| 13        | Mahasiswa mampu memahami konsep Nano-Material  |

## 2.3 Analisis Capaian Pembelajaran

### Peta (Capaian Pembelajaran)



## 2.4 RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Perguruan Tinggi      | : Universitas Mulawarman                        |
| Fakultas              | : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam |
| Program Studi         | : Fisika  |
| Mata Kuliah           | : Fisika Zat Padat                              |
| Kode Mata Kuliah      | : 190704603W034                                 |
| Semester/sks          | : VI (Enam) / 3 SKS                             |
| Mata Kuliah Prasyarat | : Fisika Kuantum, Fisika Modern, Listrik Magnet |
| Nama Dosen            | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si                 |

### A. Capaian Pembelajaran Lulusan Program Studi yang dibebankan pada mata kuliah ini adalah :

#### 1. Aspek Sikap:

-

#### 2. Aspek Keterampilan Umum:

- Mampu menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif untuk pengambilan keputusan dalam pekerjaannya, dalam konteks implementasi ilmu pengetahuan dan/atau teknologi (PLO4)
- Mampu menerapkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah dalam bentuk skripsi dan karya tulis ilmiah, untuk implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi (PLO5)

#### 3. Aspek Keterampilan Khusus:

- Mampu menganalisis berbagai persoalan fisis untuk menemukan solusi alternatif secara analitik maupun (PLO8)

#### 4. Aspek Penguasaan Pengetahuan:

- Menguasai konsep teoritis dan azas-azas pokok fisika klasik dan fisika modern untuk pemecahan masalah suatu sistem fisis (PLO10)
- Mampu mengaplikasikan konsep-konsep dan azas-azas pokok fisika serta teknologi pada bidang keahlian tertentu, seperti: fisika teori, fisika material, fisika elektronika dan instrumentasi, fisika medik, geofisika dan oseanografi fisis (PLO11)

### B. Capaian Pembelajaran Mata Kuliah:

Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari - hari

**C. PIP Unmul yang di Integrasikan :**

Mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat untuk membantu menyelesaikan masalah dalam lingkup area hutan hujan tropis di pulau Kalimantan.

**D. Deskripsi Mata Kuliah :**

Fisika Zat Padat diperlukan untuk mengetahui berbagai sifat dan perilaku zat yang berada pada fase padat. Sifat dan perilaku zat mampu dianalisis dengan mempertimbangkan unsur-unsur internal yang berupa kesetangkuhan dan keberkalaan kedudukan atom-atom dan gugus atom dalam ruang.

**E. Daftar Referensi :**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)  | Indikator  | Materi Pokok (Bahan Kajian)   | Metode/Model Pembelajaran   | Pengalaman Belajar  | Penilaian    |   | Bobot (%) | Waktu        | Referensi         |
|---------------|--|--|---|---|---|--------------|---|-----------|--------------|-------------------|
|               |  |  |   |   |   | Jenis        | Kriteria  |           |              |                   |
| 1             | Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan struktur kristal dan sel satuan</li> <li>Memahami operasi simetri</li> <li>Mengidentifikasi tipe-tipe kristal</li> <li>Menjelaskan arah kisi dan bidang kristal</li> <li>Memahami grup titik dan ruang kristal</li> <li>Membedakan struktur kristal tertentu</li> <li>Memahami kuasi-kristal</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dasar-dasar struktur kristal</li> <li>Sel satuan: struktur sel primitive</li> <li>Operasi simetri</li> <li>Tipe-tipe kristal</li> <li>Arah kisi dan bidang kisi</li> <li>Grup titik dan ruang kristal</li> <li>Struktur kristal tertentu</li> <li>Kuasi kristal</li> </ul> | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Mahasiswa mendiskusikan materi terkait konsep struktur kristal zat padat dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan menjelaskan materi terkait struktur kristal zat padat</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung terkait materi konsep struktur kristal zat padat</li> </ul> | 10        | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3, 4 |
| 2             | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep Ikatan kristal   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan kohesi atom</li> <li>Membedakan ikatan atom utama dan sekunder</li> <li>Menjelaskan energi kohesif</li> <li>Memperkirakan konstanta elastik kristal</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kohesi atom</li> <li>Ikatan atom utama</li> <li>Ikatan atom sekunder</li> <li>Energi kohesif</li> <li>Konstanta elastik kristal</li> <li>Gelombang elastik pada kristal kubik</li> </ul>   | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Mahasiswa mendiskusikan materi terkait konsep ikatan kristal dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung             | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan menjelaskan materi terkait konsep ikatan kristal</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung</li> </ul>   | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 4    |
| 3             | Mahasiswa mampu menginterpretasikan tentang konsep kisi resiprok dan penentuan striuktur kristal | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami kisi resiprok</li> <li>Menjelaskan hukum Bragg</li> <li>Menjelaskan Hubungan antara <b>a</b>, <b>b</b>, <b>c</b> dengan <b>a*</b>, <b>b*</b>, <b>c*</b></li> <li>Menginterpretasikan</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kisi resiprok</li> <li>Hukum Bragg</li> <li>Konstruksi kisi resiprok</li> <li>Hubungan antara <b>a</b>, <b>b</b>, <b>c</b> dengan <b>a*</b>,</li> </ul>  | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct</i></li> </ul>             | Mahasiswa menginterpretasikan dan mendiskusikan materi terkait konsep kisi resiprok dan penentuan                               | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan menginterpretasikan dan menjelaskan materi terkait dengan kisi resiprok dan penentuan</li> </ul>   | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3, 4 |

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)  | Indikator  | Materi Pokok (Bahan Kajian)   | Metode/Model Pembelajaran  | Pengalaman Belajar  | Penilaian    |   | Bobot (%) | Waktu        | Referensi            |
|---------------|--|--|---|--|---|--------------|---|-----------|--------------|----------------------|
|               |  |  |   |  |   | Jenis        | Kriteria  |           |              |                      |
|               |  | pengukuran pola difraksi kristal<br>• Memperkirakan konstanta kisi   | <b>b*, c*</b><br>• Pengukuran pola difraksi kristal<br>• Penentuan konstanta kisi   | <i>Instruction</i>   | striuktur kristal dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung  |              | striuktur kristal<br>• Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung  |           |              |                      |
| 4             | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep vibrasi kristal            | • Memahami model harmonik kristal<br>• Menjelaskan mode normal rantai monoatomik dan diatomik 1D<br>• Memahami kuantisasi vibrasi kisi | • Model harmonik kristal<br>• Mode normal rantai monoatomik 1D<br>• Mode normal rantai diatomik 1D<br>• Teori umum pendekatan harmonic<br>• Kuantisasi vibrasi kisi | Metode Pembelajaran<br>• Ceramah<br>• Diskusi<br>• Tugas/Latihan Model pembelajaran<br>• <i>Direct Instruction</i> | Mahasiswa mendiskusikan materi terkait konsep vibrasi kristal dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung            | Tes tertulis | • Ketepatan menjelaskan materi terkait dengan vibrasi kristal<br>• Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung            | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3, 4, 5 |
| 5             | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan | • Membedakan kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik dan kuantum<br>• Memahami efek tak-harmonik                                   | • Kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik<br>• Kapasitas panas berdasarkan tinjauan kuantum<br>• Efek tak-harmonik (un-harmonic)                                | Metode Pembelajaran<br>• Ceramah<br>• Diskusi<br>• Tugas/Latihan Model pembelajaran<br>• <i>Direct Instruction</i> | Mahasiswa mendiskusikan materi terkait konsep sifat-sifat termal padatan dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung | Tes tertulis | • Ketepatan menjelaskan materi terkait dengan sifat-sifat termal padatan<br>• Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3, 4, 5 |

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)                              | Indikator  | Materi Pokok (Bahan Kajian)   | Metode/Model Pembelajaran   | Pengalaman Belajar  | Penilaian    |  | Bobot (%) | Waktu        | Referensi      |
|---------------|--|--|---|---|---|--------------|--|-----------|--------------|----------------|
|               |  |  |   |   |   | Jenis        | Kriteria   |           |              |                |
| 6             | Mahasiswa mampu memahami teori elektron bebas pada logam | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami dan menjelaskan model Drude</li> <li>Memahami dan menjelaskan Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>Memahami dan menerapkan Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>Memahami dan menjelaskan Model Sommerfeld</li> <li>Memahami kapasitas panas elektron</li> <li>Menerapkan teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>Memahami dan menjelaskan Aturan Matthiessen</li> <li>Mengidentifikasi bahan termoelektrik</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Model Drude</li> <li>Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>Model Sommerfeld</li> <li>Kapasitas panas elektron</li> <li>Teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>Aturan Matthiessen</li> <li>Bahan termoelektrik</li> </ul> | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Mahasiswa mendiskusikan materi terkait teori elektron bebas pada logam dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan menjelaskan materi terkait dengan teori elektron bebas pada logam</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung</li> </ul> | 10        | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 3, 4 |
| 7             | Mahasiswa mampu memahami konsep pita energi elektron     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami Konsekuensi dari periodisitas</li> <li>Menginterpretasikan gelombang mekanik dalam pita energi</li> <li>Menjelaskan model Kronig-Penney</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Konsekuensi dari periodisitas</li> <li>Interpretasi gelombang mekanik dalam pita energi</li> <li>Model Kronig-Penney</li> </ul>  | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Mahasiswa mendiskusikan materi terkait pita energi electron dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung            | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan menjelaskan materi terkait dengan pita energi elektron</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses</li> </ul>                                     | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 3, 4 |

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)  | Indikator   | Materi Pokok (Bahan Kajian)   | Metode/Model Pembelajaran   | Pengalaman Belajar   | Penilaian    |   | Bobot (%) | Waktu        | Referensi            |
|---------------|--|---|---|---|--|--------------|---|-----------|--------------|----------------------|
|               |  |   |   |   |  | Jenis        | Kriteria  |           |              |                      |
|               |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan model elektron hampir bebas</li> <li>Memahami skema zona pita energi</li> <li>Menjelaskan Pita energi dalam potensial periodik</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Model elektron hampir bebas</li> <li>Skema zona pita energi</li> <li>Pita energi dalam potensial periodic</li> <li>Isolator, semikonduktor dan konduktor</li> </ul>      |   |  |              | pembelajaran berlangsung  |           |              |                      |
| 8             | <b>UJIAN TENGAH SEMESTER (UTS)</b>                                     |   |   |   |  |              |   |           |              |                      |
| 9             | Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami konsep hole dan massa efektif</li> <li>Menjabarkan konstruksi permukaan Fermi</li> <li>Memahami dan menjelaskan Elektron dalam medan magnet seragam</li> <li>Menjelaskan resonansi siklotron</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Konsep hole</li> <li>Massa efektif</li> <li>Konstruksi permukaan Fermi</li> <li>Elektron dalam medan magnet seragam</li> <li>Resonansi siklotron</li> </ul>              | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Mahasiswa mendiskusikan materi terkait mobilitas elektron dan permukaan Fermi dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan menjelaskan materi terkait dengan mobilitas elektron dan permukaan Fermi</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung</li> </ul> | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3, 4    |
| 10 - 11       | Mahasiswa mampu mengklasifikasi konsep Semikonduktor                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami dan mengklasifikasi pengelompokan semikonduktor</li> <li>Memahami dan menjabarkan struktur pita energi</li> <li>Menjelaskan rapat</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pengelompokan semikonduktor</li> <li>Struktur pita energi</li> <li>Rapat pembawa muatan intrinsic</li> <li>Semikonduktor ekstrinsik</li> <li>Populasi tingkat</li> </ul> | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Pendekatan pembelajaran</li> <li><i>Problem</i></li> </ul>       | Mahasiswa melakukan klasifikasi terkait materi konsep Semikonduktor dan bertanya pada saat   | Product      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan mengklasifikasi konsep Semikonduktor</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses</li> </ul>  | 10        | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3, 4, 5 |

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)                     | Indikator   | Materi Pokok (Bahan Kajian)  | Metode/Model Pembelajaran   | Pengalaman Belajar  | Penilaian    |  | Bobot (%) | Waktu        | Referensi            |
|---------------|---|---|--|---|---|--------------|--|-----------|--------------|----------------------|
|               |   |   |  |   |   | Jenis        | Kriteria   |           |              |                      |
|               |   | <p>pembawa muatan intrinsik</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan dan menentukan semikonduktor ekstrinsik</li> <li>Memprediksi Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul>  | donor dan akseptor dalam keadaan setimbang   | <i>Based Learning (PBL)</i>   | proses pembelajaran berlangsung   |              | <ul style="list-style-type: none"> <li>pembelajaran berlangsung</li> <li>Product yang dihasilkan</li> </ul>  |           |              |                      |
|               |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memprediksi rapat pembawa muatan ekstrinsik</li> <li>Menjelaskan Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur</li> <li>Memahami efek Hall</li> <li>Menjelaskan sambungan <i>p-n</i></li> <li>Menjabarkan efek termoelektrik</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rapat pembawa muatan ekstrinsik</li> <li>Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur</li> <li>Efek Hall</li> <li>Sambungan <i>p-n</i></li> <li>Efek termoelektrik</li> </ul> | <p>Metode Pembelajaran</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Pendekatan pembelajaran</li> <li><i>Problem Based Learning (PBL)</i></li> </ul> | Mahasiswa melakukan klasifikasi terkait dengan materi konsep Semikonduktor dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung | Product      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan mengklasifikasi konsep Semikonduktor</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung</li> <li>Product yang dihasilkan</li> </ul> | 10        | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3, 4, 5 |
| 12            | Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>Mengklasifikasikan tipe - tipe kemagnetan bahan</li> <li>Membedakan sifat Ferromagnetisme, Antiferromagnetisme, dan Ferrimagnetisme</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>Tipe-tipe kemagnetan bahan</li> <li>Diamagnetisme</li> <li>Paramagnetisme</li> </ul>  | <p>Metode Pembelajaran</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul>                | Mahasiswa mendiskusikan materi terkait sifat kemagnetan bahan dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung              | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan menjelaskan materi terkait dengan sifat kemagnetan bahan</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung</li> </ul>              | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3       |

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)  | Indikator  | Materi Pokok (Bahan Kajian)   | Metode/Model Pembelajaran  | Pengalaman Belajar   | Penilaian    |   | Bobot (%) | Waktu        | Referensi         |
|---------------|--|--|---|--|--|--------------|---|-----------|--------------|-------------------|
|               |  |  |   |  |  | Jenis        | Kriteria  |           |              |                   |
| 13            | Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami konsep polarisasi</li> <li>Memperkirakan konstanta dielektrik</li> <li>Menjelaskan pengaruh medan listrik lokal</li> <li>Memahami polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>Mengidentifikasi rugi-rugi dielektrik</li> <li>Menjelaskan fenomena optik</li> <li>Memahami aplikasi plasma</li> <li>Memahami mode fonon pada kristal ionik</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Polarisasi</li> <li>Konstanta dielektrik</li> <li>Medan listrik lokal</li> <li>Polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>Rugi-rugi dielektrik</li> <li>Fenomena optik</li> <li>Aplikasi Plasma</li> <li>Aplikasi mode fonon pada kristal ionik</li> </ul>                            | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan</li> </ul> Model pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Mahasiswa menyebutkan contoh aplikasi materi dielektrik dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung                         | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan menyebutkan contoh aplikasi materi terkait dengan dielektrik</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung</li> </ul>       | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3, 5 |
| 14            | Mahasiswa mampu mengklasifikasikan tentang konsep superkonduktivitas | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan sejarah perkembangan superkonduktivitas</li> <li>Memahami resistivitas listrik</li> <li>Memahami efek Meissner</li> <li>Memahami Arus-super dan kedalaman penetrasi</li> <li>Mengklasifikasikan Superkonduktor tipe I dan II</li> <li>Memahami Sifat termodinamik dan optik</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pendahuluan dan sejarah perkembangan</li> <li>Resistivitas listrik</li> <li>Efek Meissner</li> <li>Arus-super dan kedalaman penetrasi</li> <li>Superkonduktor tipe I dan II</li> <li>Sifat termodinamik dan optik</li> <li>Efek isotop</li> <li>Efek Josephson</li> <li>Teori BCS</li> </ul> | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan</li> </ul> Model pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Mahasiswa melakukan klasifikasi terkait dengan materi konsep superkonduktivitas dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan mengklasifikasikan materi terkait dengan konsep superkonduktivitas</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung</li> </ul> | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 3, 4 |

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)                   | Indikator   | Materi Pokok (Bahan Kajian)   | Metode/Model Pembelajaran   | Pengalaman Belajar  | Penilaian    |  | Bobot (%) | Waktu        | Referensi         |
|---------------|---|---|---|---|---|--------------|--|-----------|--------------|-------------------|
|               |   |   |   |   |   | Jenis        | Kriteria   |           |              |                   |
|               |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan efek isotop dan Josephson</li> <li>Memahami teori BCS</li> <li>Memberi contoh aplikasi superkonduktor</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aplikasi</li> </ul>  |   |   |              |  |           |              |                   |
| 15            | Mahasiswa mampu memahami konsep Nano-Material | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami pengertian nano-partikel dan nano-struktur</li> <li>Menjelaskan dan menggambarkan sifat silikon berporos</li> <li>Menjabarkan teknik fabrikasi</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pendahuluan</li> <li>Nano-partikel</li> <li>Nano-struktur</li> <li>Silikon berporos</li> <li>Teknik Fabrikasi</li> </ul> | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Mahasiswa mendiskusikan materi terkait dengan konsep Nano-Material dan bertanya pada saat proses pembelajaran berlangsung | Tes tertulis | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ketepatan menjelaskan materi terkait dengan Nano-Material</li> <li>Keaktifan bertanya saat proses pembelajaran berlangsung</li> </ul> | 6         | 3 x 50 Menit | Buku : 1, 2, 4, 5 |
| 16            | <b>UJIAN AKHIR SEMESTER (UAS)</b>             |   |   |   |   |              |  |           |              |                   |

**Penilaian:**

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 1. Ujian Tengah Semester | 45% |
| 2. Ujian Akhir Semester  | 45% |
| 3. Afektif               | 10% |

Mengetahui,  
Koordinator Program Studi

Dr. Rahmawati Munir, S.Si., M.Si  
NIP. 19801201200604 2 001

Samarinda, Desember 2022

Dosen Pengampu Mata Kuliah

Dr. Dadan Hamdani, S.Si., M.Si  
NIP. 19730223 200012 1 001

## 2.5 RENCANA PELAKSANAAN PEMBELAJARAN (RPP)

|  |  |
|--|--|
| Program Studi  | : Fisika   |
| Mata Kuliah  | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah                                       | : 190700603W001  |
| Semester/sks   | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu                                     | : 1 / 1 x 3 x 50 menit   |
| Dosen Pengampu   | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK   | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari  |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK)                            | : Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat  |
| Deskripsi Mata Kuliah                                  | : Mata kuliah ini membahas tentang Dasar-dasar struktur kristal, Sel satuan: struktur sel primitive, Operasi simetri, Tipe-tipe kristal, Arah kisi dan bidang kisi, Grup titik dan ruang kristal, Struktur kristal tertentu, dan Kuasi kristal   |
| Indikator  | : <ul style="list-style-type: none"><li>• Menjelaskan struktur kristal dan sel satuan</li><li>• Memahami operasi simetri</li><li>• Mengidentifikasi tipe-tipe kristal</li><li>• Menjelaskan arah kisi dan bidang kristal</li><li>• Memahami grup titik dan ruang kristal</li><li>• Membedakan struktur kristal tertentu</li><li>• Memahami kuasi-kristal</li></ul>   |
| Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini: | <ul style="list-style-type: none"><li>• Mahasiswa mampu menjelaskan struktur kristal dan sel satuan</li><li>• Mahasiswa mampu memahami operasi simetri</li><li>• Mahasiswa mampu mengidentifikasi tipe-tipe kristal</li><li>• Mahasiswa mampu menjelaskan arah kisi dan bidang kristal</li><li>• Mahasiswa mampu memahami grup titik dan ruang kristal</li><li>• Mahasiswa mampu membedakan struktur kristal tertentu</li><li>• Mahasiswa mampu memahami kuasi-kristal</li></ul> |
| Materi Pokok (Bahan Kajian):                           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Dasar-dasar struktur kristal</li><li>• Sel satuan: struktur sel primitive</li><li>• Operasi simetri</li></ul>  |

- Tipe-tipe kristal
- Arah kisi dan bidang kisi
- Grup titik dan ruang kristal
- Struktur kristal tertentu
- Kuasi kristal

Minggu ke 1

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|---|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menyampaikan kontrak perkuliahan</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode dan model pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mempelajari terkait dengan materi fisika modern</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :<br/>               1) Dasar-dasar struktur kristal<br/>               2) Sel satuan: struktur sel primitive<br/>               3) Operasi simetri<br/>               4) Tipe-tipe kristal<br/>               5) Arah kisi dan bidang kisi<br/>               6) Grup titik dan ruang kristal<br/>               7) Struktur kristal tertentu<br/>               8) Kuasi kristal</li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 3<br>Buku 4    | Tes tertulis |
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-2 terkait dengan konsep Ikatan kristal</li> </ul>  | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul>  | 10 menit      | Buku 4                                  | Tugas 1      |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Dalam sistem kristal sederhana ortorombik, dua titik kisi terhubung satu sama lain dengan vektor translasi  $T = 2a + 3b + 4c$ , dimana  $a = 2\text{\AA}$ ,  $b = 3\text{\AA}$  dan  $c = 4\text{\AA}$ . Tentukan nilai dan arah vektor translasi!
2. Elemen kristal dengan struktur FCC dengan parameter sel satuan sebesar  $2\text{\AA}$ . Hitung kerapatannya jika 0.2 kg unsur tersebut mengandung  $24 \times 10^{24}$  atom.
3. Tentukan indeks Miller pada bidang yang melalui perpotongan pada  $3a, 4b, 6c$  sepanjang sumbu kristalik, dimana  $a, b, c$  merupakan vektor translasi primitif dari kisi.
4. Gambarkan bidang  $(\bar{1}11), (1\bar{1}2), (\bar{2}10)$
5. Jarak antara bidang  $(111)$  pada kristal FCC adalah  $2\text{\AA}$ . Tentukan parameter kisi dan diameter atomik.

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Program Studi               | : Fisika   |
| Mata Kuliah                 | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah            | : 190700603W001  |
| Semester/sks                | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu          | : 2 / 1 x 3 x 50 menit   |
| Dosen Pengampu              | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK                        | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari  |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK) | : Mahasiswa mampu memahami tentang konsep Ikatan kristal   |
| Deskripsi Mata Kuliah       | : Mata kuliah ini membahas tentang Kohesi atom, Ikatan atom utama, Ikatan atom sekunder, Energi kohesif, Konstanta elastik kristal, dan Gelombang elastik pada kristal kubik |

Indikator :

- Menjelaskan kohesi atom
- Membedakan ikatan atom utama dan sekunder
- Menjelaskan energi kohesif
- Memperkirakan konstanta elastik kristal

Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini:

- Mahasiswa mampu menjelaskan kohesi atom
- Mahasiswa mampu membedakan ikatan atom utama dan sekunder
- Mahasiswa mampu menjelaskan energi kohesif
- Mahasiswa mampu memperkirakan konstanta elastik kristal

Materi Pokok (Bahan Kajian):

- Kohesi atom
- Ikatan atom utama
- Ikatan atom sekunder
- Energi kohesif
- Konstanta elastik kristal
- Gelombang elastik pada kristal kubik

Minggu ke 2

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|--|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Dasar-dasar struktur kristal, Sel satuan: struktur sel primitive, Operasi simetri, Tipe-tipe kristal, Arah kisi dan bidang kisi, Grup titik dan ruang kristal, Struktur kristal tertentu, dan Kuasi kristal</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Kohesi atom</li> <li>2) Ikatan atom utama</li> <li>3) Ikatan atom sekunder</li> <li>4) Energi kohesif</li> <li>5) Konstanta elastik kristal</li> <li>6) Gelombang elastik pada kristal kubik</li> </ol> </li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>  | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 4              | Tes tertulis |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|--|--|---------------|---|-----------|
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-3 terkait dengan konsep kisi resiprok dan penentuan struktur kristal</li> </ul> | Metode: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul> | 10 menit      | Buku 4                                  | Tugas 2   |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Energi potensial molekul diatomik dalam bentuk jarak interatomik  $R$  diberikan oleh:

$$U(R) = -\frac{A}{R^m} + \frac{B}{R^n}$$

Dimana  $A, B, m, n$  menyatakan konstanta karakteristik dari molekul  $MX$

- a. Turunkan pernyataan yang menyatakan jarak antar dalam keadaan setimbang
  - b. Jelaskan pentingnya jarak setimbang sebagai konfigurasi dengan energi potensial terendah, selanjutnya dapatkan pernyataan untuk energi disosiasi atom
  - c. Buktikan bahwa untuk  $n > m$  untuk  $U(R)$  menjadi minimum pada  $R = R_e$
2. Tentukan energi potensial molekul CsCl pada kondisi setimbang, jika jarak pisah antara atom Cesium dan Chlorine adalah  $3.56 \text{ \AA}$ ,  $A = 1.76$  dan  $n = 11.5$ .
  3. Tentukan jarak tetangga terdekat pada struktur BCC dan FCC, ketika radius atom diberikan  $10 \text{ \AA}$

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Mata Kuliah                 | : Fisika Zat Padat  |
| Kode Mata Kuliah            | : 190700603W001   |
| Semester/sks                | : VI (Enam) / 3 SKS   |
| Pertemuan Ke/Waktu          | : 3 / 1 x 3 x 50 menit  |
| Dosen Pengampu              | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si  |
| CPMK                        | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari   |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK) | : Mahasiswa mampu menginterpretasikan tentang konsep kisi resiprok dan penentuan struktur kristal   |
| Deskripsi Mata Kuliah       | : Mata kuliah ini membahas tentang Kisi resiprok, Hukum Bragg, Konstruksi kisi resiprok, Hubungan antara <b>a, b, c</b> dengan <b>a*, b*, c*</b> , Pengukuran pola difraksi kristal, dan Penentuan konstanta kisi |

Indikator :

- Memahami kisi resiprok
- Menjelaskan hukum Bragg
- Menjelaskan Hubungan antara **a, b, c** dengan **a\*, b\*, c\***
- Menginterpretasikan pengukuran pola difraksi kristal
- Memperkirakan konstanta kisi

Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini:

- Mahasiswa mampu memahami kisi resiprok
- Mahasiswa mampu menjelaskan hukum Bragg
- Mahasiswa mampu menjelaskan Hubungan antara **a, b, c** dengan **a\*, b\*, c\***
- Mahasiswa mampu menginterpretasikan pengukuran pola difraksi kristal
- Mahasiswa mampu memperkirakan konstanta kisi

Materi Pokok (Bahan Kajian):

- Kisi resiprok
- Hukum Bragg
- Konstruksi kisi resiprok
- Hubungan antara **a, b, c** dengan **a\*, b\*, c\***
- Pengukuran pola difraksi kristal
- Penentuan konstanta kisi

Minggu ke 3

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|--|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Kohesi atom, Ikatan atom utama, Ikatan atom sekunder, Energi kohesif, Konstanta elastik kristal, dan Gelombang elastik pada kristal kubik</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Kisi resiprok</li> <li>2) Hukum Bragg</li> <li>3) Konstruksi kisi resiprok</li> <li>4) Hubungan antara <b>a</b>, <b>b</b>, <b>c</b> dengan <b>a*</b>, <b>b*</b>, <b>c*</b></li> <li>5) Pengukuran pola difraksi kristal</li> <li>6) Penentuan konstanta kisi</li> </ol> </li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>                        | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 3<br>Buku 4    | Tes tertulis |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|---|--|---------------|---|-----------|
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-4 terkait dengan konsep vibrasi kristal</li> </ul> | Metode: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul> | 10 menit      | Buku 2                                  | Tugas 3   |

### Referensi:

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

### Soal :

1. Tunjukkan bahwa volume sel satuan primitif dari struktur BCC diberikan oleh  $a^3/2$ , jika diketahui vektor translasi primitif dari kisi BCC diberikan oleh:

$$a' = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k})$$

$$b' = \frac{a}{2}(-\hat{i} + \hat{j} + \hat{k})$$

$$c' = \frac{a}{2}(\hat{i} - \hat{j} + \hat{k})$$

Dengan  $a$  menyatakan panjang sisi kubus,  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  menyatakan vektor satuan orthogonal sepanjang sisi-sisi kubus. Selanjutnya tentukan pula vektor kisi resiproknya.

2. Suatu berkas sinar-x dengan panjang gelombang  $0.71 \text{ \AA}$  didifraksikan oleh kristal kubik KCl dengan kerapatan  $1.99 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ . Hitung jarak interplanar untuk bidang (200) dan sudut *glancing* untuk pantulan orde kedua dari bidang ini. Jika berat molekuler dari KCl adalah 74.6 amu dan bilangan Avogadro  $6.023 \times 10^{26} \text{ kg}^{-1} \text{ mole}^{-1}$
3. Sebuah kamera dengan radius 57.3 mm digunakan untuk mengamati pola difraksi serbuk emas (FCC) dengan parameter kisi  $4.08 \text{ \AA}$ . Sebuah cahaya monokromatik dengan radiasi  $\text{Mo} - \text{K}_{\alpha}$  memiliki panjang gelombang  $0.71 \text{ \AA}$ . Tentukan empat nilai S yang pertama.

### Lampiran

1. Materi Pembelajaran

|  |  |
|--|--|
| Program Studi  | : Fisika   |
| Mata Kuliah  | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah                                       | : 190700603W001  |
| Semester/sks   | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu                                     | : 4 / 1 x 3 x 50 menit   |
| Dosen Pengampu   | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK   | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari  |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK)                            | : Mahasiswa mampu memahami tentang konsep vibrasi kristal  |
| Deskripsi Mata Kuliah                                  | : Mata kuliah ini membahas tentang Model harmonik kristal, Mode normal rantai monoatomik 1D, Mode normal rantai diatomik 1D, Teori umum pendekatan harmonic, dan Kuantisasi vibrasi kisi   |
| Indikator  | : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami model harmonik kristal</li> <li>• Menjelaskan mode normal rantai monoatomik dan diatomik 1D</li> <li>• Memahami kuantisasi vibrasi kisi</li> </ul>   |
| Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini: | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami model harmonik kristal</li> <li>• Mahasiswa mampu menjelaskan mode normal rantai monoatomik dan diatomik 1D</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami kuantisasi vibrasi kisi</li> </ul> |
| Materi Pokok (Bahan Kajian):                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Model harmonik kristal</li> <li>• Mode normal rantai monoatomik 1D</li> <li>• Mode normal rantai diatomik 1D</li> <li>• Teori umum pendekatan harmonic</li> <li>• Kuantisasi vibrasi kisi</li> </ul>        |

Minggu ke 4

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media        | Penilaian    |
|----|-------|--|--|---------------|--|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Kisi resiprok, Hukum Bragg, Konstruksi kisi resiprok, Hubungan antara <b>a</b>, <b>b</b>, <b>c</b> dengan <b>a*</b>, <b>b*</b>, <b>c*</b>, Pengukuran pola difraksi kristal, dan Penentuan konstanta kisi</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |  |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :<br/>               1) Model harmonik kristal<br/>               2) Mode normal rantai monoatomik 1D<br/>               3) Mode normal rantai diatomik 1D<br/>               4) Teori umum pendekatan harmonic<br/>               5) Kuantisasi vibrasi kisi</li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 3<br>Buku 4<br>Buku 5 | Tes tertulis |
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul>  | 10 menit      | Buku 4   | Tugas 4      |

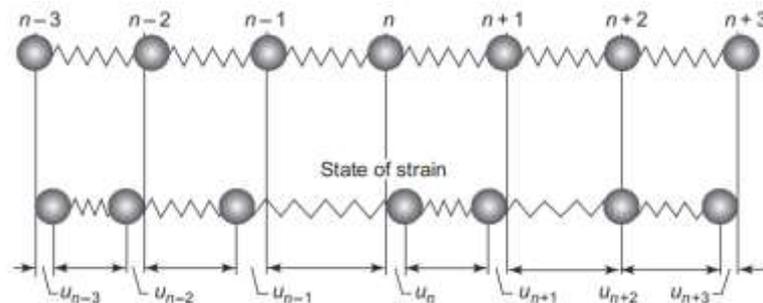
| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran                              | Metode/Model Pembelajaran | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|--|---------------------------|---------------|---|-----------|
|    |       | 5 terkait dengan konsep sifat-sifat termal padatan |                           |               |   |           |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Perhatikan Gambar yang menunjukkan Rantai linier atom identik dengan konstanta kisi = a. Dalam posisi kesetimbangan, kisi memiliki simetri translasi. Pada posisi regangan, atom ke-i dipindahkan sejauh  $U_i$  dari posisi setimbangnya



Tentukan hubungan disperse yang menyatakan hubungan antara frekuensi angular dan vektor gelombang ( $\omega$ -k) untuk kisi periodik 1D, seperti ditunjukkan pada Gambar di atas.

2. Jika kecepatan bunyi dalam padatan diambil sekitar  $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  dan jarak interatomik  $3 \times 10^{-10} \text{ m}$ , hitung nilai frekuensi cutoff pada kisi linera.
3. Jika kecepatan bunyi dalam padatan berada pada orde  $10^3 \text{ ms}^{-1}$ , dibandingkan frekuensi gelombang bunyi  $\lambda = 10 \text{ \AA}$  untuk (a) sistem monoatomik, (b) Gelombang akustik dan optik dalam sistem diatomik yang mengandung dua atom identik ( $m = M$ ) per sel satuan dengan jarak interatomik  $2.5 \text{ \AA}$ .

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

|  |  |
|--|--|
| Program Studi  | : Fisika   |
| Mata Kuliah  | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah                                       | : 190700603W001  |
| Semester/sks   | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu                                     | : 5 / 1 x 3 x 50 menit   |
| Dosen Pengampu   | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK   | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari  |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK)                            | : Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan   |
| Deskripsi Mata Kuliah                                  | : Mata kuliah ini membahas tentang Kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik, Kapasitas panas berdasarkan tinjauan kuantum, dan Efek tak-harmonik (un-harmonic)                                  |
| Indikator  | :<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Membedakan kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik dan kuantum</li> <li>• Memahami efek tak-harmonik</li> </ul>                                  |
| Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini: | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu membedakan kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik dan kuantum</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami efek tak-harmonik</li> </ul>       |
| Materi Pokok (Bahan Kajian):                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik</li> <li>• Kapasitas panas berdasarkan tinjauan kuantum</li> <li>• Efek tak-harmonik (un-harmonic)</li> </ul> |

Minggu ke 5

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media        | Penilaian    |
|----|-------|--|--|---------------|--|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Model harmonik kristal, Mode normal rantai monoatomik 1D, Mode normal rantai diatomik 1D, Teori umum pendekatan harmonic, dan Kuantisasi vibrasi kisi</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |  |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :<br/>               1) Kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik<br/>               2) Kapasitas panas berdasarkan tinjauan kuantum<br/>               3) Efek tak - harmonik (un-harmonic)</li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>  | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 3<br>Buku 4<br>Buku 5 | Tes tertulis |
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul>  | 10 menit      | Buku 4   | Tugas 5      |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran                            | Metode/Model Pembelajaran | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|--|---------------------------|---------------|---|-----------|
|    |       | 6 terkait dengan teori elektron bebas pada logam |                           |               |   |           |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Cahaya tampak dengan panjang gelombang  $5000 \text{ \AA}$  mengalami penghamburan oleh kristal dengan indeks bias  $n = 1.5$ . Hitung frekuensi maksimum dari fonon yang dibangkitkan dan perubahan fraksional frekuensi dari radiasi yang datang, jika diberikan kecepatan rambat bunyi dalam kristal adalah  $5000 \text{ ms}^{-1}$ .
2. Emas memiliki struktur yang sama dengan struktur tembaga. Jika diketahui kecepatan rambat bunyi di dalam emas adalah  $2100 \text{ ms}^{-1}$  dan dalam tembaga  $3800 \text{ ms}^{-1}$ . Jika temperatur Debye tembaga adalah  $348 \text{ K}$ , maka tentukan temperatur Debye dalam emas. Kerapatan emas dan tembaga masing-masing adalah  $1.93 \times 10^4 \text{ kgm}^{-3}$  dan  $8960 \text{ kgm}^{-3}$  dengan berat atom keduanya masing-masing  $197.0$  dan  $63.54 \text{ amu}$ .
3. Diketahui bahwa jari-jari ion-ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  adalah  $0.98$  dan  $1.81 \text{ \AA}$ . Modulus Young untuk  $\text{NaCl}$  dalam arah  $[100]$  adalah  $5 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$ . Dengan asumsi bahwa perluasan arah  $[100]$  yang dihasilkan kontraksi diabaikan dalam arah tegak lurus, maka hitung panjang gelombang yang mana radiasi elektromagnetik sangat kuat dipantulkan oleh kristal  $\text{NaCl}$ . Massa atom  $\text{Na}$  dan  $\text{Cl}$  masing-masing  $23$  dan  $35.5$ .

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

|  |  |
|--|--|
| Program Studi  | : Fisika   |
| Mata Kuliah  | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah                                       | : 190700603W001  |
| Semester/sks   | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu                                     | : 6 / 1 x 3 x 50 menit   |
| Dosen Pengampu   | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK   | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari  |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK)                            | : Mahasiswa mampu memahami tentang teori elektron bebas pada logam   |
| Deskripsi Mata Kuliah                                  | : Mata kuliah ini membahas tentang Model Drude, Modifikasi Lorentz pada Model Drude, Fungsi distribusi Fermi-Dirac, Model Sommerfeld, Kapasitas panas electron, Teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam, Aturan Matthiessen, dan Bahan termoelektrik   |
| Indikator  | : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami dan menjelaskan model Drude</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>• Memahami dan menerapkan Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Model Sommerfeld</li> <li>• Memahami kapasitas panas elektron</li> <li>• Menerapkan teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Aturan Matthiessen</li> <li>• Mengidentifikasi bahan termoelektrik</li> </ul>   |
| Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini: | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan model Drude</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami dan menerapkan Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan Model Sommerfeld</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami kapasitas panas elektron</li> <li>• Mahasiswa mampu menerapkan teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan Aturan Matthiessen</li> <li>• Mahasiswa mampu mengidentifikasi bahan termoelektrik</li> </ul> |
| Materi Pokok (Bahan Kajian):                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Model Drude</li> </ul>  |

- Modifikasi Lorentz pada Model Drude
- Fungsi distribusi Fermi-Dirac
- Model Sommerfeld
- Kapasitas panas elektron
- Teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam
- Aturan Matthiessen
- Bahan termoelektrik

Minggu ke 6

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|---|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik, Kapasitas panas berdasarkan tinjauan kuantum, dan Efek tak - harmonik (un-harmonic)</li> </ul>                             | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Model Drude</li> <li>2) Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>3) Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>4) Model Sommerfeld</li> <li>5) Kapasitas panas elektron</li> <li>6) Teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>7) Aturan Matthiessen</li> <li>8) Bahan termoelektrik</li> </ol> </li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 3<br>Buku 4              | Tes tertulis |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|--|--|---------------|---|-----------|
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-7 terkait dengan konsep pita energi elektron</li> </ul> | Metode: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul> | 10 menit      | Buku 4                                  | Tugas 6   |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Jari-jari atomik sodium adalah  $1.86 \text{ \AA}$ . Hitung energi Fermi sodium pada saat temperatur nol mutlak.
2. Turunkan hubungan tekanan terhadap volume untuk gas elektron bebas pada 0 K. Selanjutnya dapatkan hubungan untuk modulus bulk dalam bentuk energi kinetik rata-rata.
3. Logam Na dengan struktur BCC memiliki dua atom per sel satuan. Jika jari-jari atom Na adalah  $1.85 \text{ \AA}$ . Hitung resistivitas elektriknya pada saat  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  jika nilai klasik dari waktu bebas rata-rata pada temperatur ini adalah  $3 \times 10^{-14}$  detik.

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Program Studi               | : Fisika   |
| Mata Kuliah                 | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah            | : 190700603W001  |
| Semester/sks                | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu          | : 7 / 1 x 3 x 50 menit   |
| Dosen Pengampu              | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK                        | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari  |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK) | : Mahasiswa mampu memahami konsep pita energi elektron   |
| Deskripsi Mata Kuliah       | : Mata kuliah ini membahas tentang Konsekuensi dari periodisitas , Interpretasi gelombang mekanik dalam pita energi, Model Kronig-Penney, Model elektron hampir bebas, Skema zona pita energi, Pita energi dalam potensial periodic, dan Isolator, semikonduktor dan konduktor |

Indikator :

- Memahami Konsekuensi dari periodisitas
- Menginterpretasikan gelombang mekanik dalam pita energi
- Menjelaskan model Kronig-Penney
- Menjelaskan model elektron hampir bebas
- Memahami skema zona pita energi
- Menjelaskan Pita energi dalam potensial periodic

Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini:

- Mahasiswa mampu memahami Konsekuensi dari periodisitas
- Mahasiswa mampu menginterpretasikan gelombang mekanik dalam pita energi
- Mahasiswa mampu menjelaskan model Kronig-Penney
- Mahasiswa mampu menjelaskan model elektron hampir bebas
- Mahasiswa mampu memahami skema zona pita energi
- Mahasiswa mampu menjelaskan Pita energi dalam potensial periodic

Materi Pokok (Bahan Kajian):

- Konsekuensi dari periodisitas
- Interpretasi gelombang mekanik dalam pita energi
- Model Kronig-Penney
- Model elektron hampir bebas
- Skema zona pita energi
- Pita energi dalam potensial periodic

- Isolator, semikonduktor dan konduktor

Minggu ke 7

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|--|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Model Drude, Modifikasi Lorentz pada Model Drude, Fungsi distribusi Fermi-Dirac, Model Sommerfeld, Kapasitas panas electron, Teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam, Aturan Matthiessen, dan Bahan termoelektrik</li> </ul> | <p>Metode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Konsekuensi dari periodisitas</li> <li>2) Interpretasi gelombang mekanik dalam pita energi</li> <li>3) Model Kronig-Penney</li> <li>4) Model elektron hampir bebas</li> <li>5) Skema zona pita energi</li> <li>6) Pita energi dalam potensial periodic</li> <li>7) Isolator, semikonduktor dan</li> </ol> </li> </ul>   | <p>Metode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> <p>Model:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 3<br>Buku 4              | Tes tertulis |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran   | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|---|---|---------------|---|-----------|
|    |       | <p>konduktor</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>  |   |               |   |           |
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-8 adalah akan dilakukan Ujian Tengah Semester (UTS)</li> </ul> | <p>Metode:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul> | 10 menit      | Buku 4                                  | Tugas 7   |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Buktikan bahwa potensial Kronig-Penney  $P \ll 1$ , dimana pita energi terendah pada  $k = 0$  dinyatakan dalam bentuk:

$$E = \frac{h^2 P}{4\pi^2 m a^2}$$

2. Jelaskan secara singkat tentang model elektron hampir bebas (nearly free electron model) dalam menjelaskan keberadaan celah energi terlarang (energy gap) dalam zat padat yang membedakan sifat-sifat penghantarannya!
3. Jelaskan beberapa kelemahan penggunaan model elektron bebas (*free electron model*) dalam menjelaskan sifat-sifat zat padat secara keseluruhan!
4. Model elektron bebas untuk logam, mengasumsikan bahwa elektron konduksi dapat diaproksimasi dengan gas elektron bebas, dimana parameter untuk gas yang penting yaitu  $n$  jumlah kerapatan elektron dan  $\tau$  waktu antar tumbukan elektron. Tunjukkan bahwa konduktivitas listrik dari model ini untuk logam dinyatakan dengan persamaan :

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

Jika diketahui resistivitas logam Cu  $1.7 \times 10^{-6}$  Ohm cm dan kerapatan atom Cu  $8.5 \times 10^{28}$  atom/cm<sup>3</sup>, perkirakan waktu tumbukan  $\tau$  dari elektron Cu.

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Program Studi               | : Fisika  |
| Mata Kuliah                 | : Fisika Zat Padat  |
| Kode Mata Kuliah            | : 190700603W001   |
| Semester/sks                | : VI (Enam) / 3 SKS   |
| Pertemuan Ke/Waktu          | : 9 / 1 x 3 x 50 menit  |
| Dosen Pengampu              | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si  |
| CPMK                        | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari   |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK) | : Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi  |
| Deskripsi Mata Kuliah       | : Mata kuliah ini membahas tentang Konsep hole, Massa efektif, Konstruksi permukaan Fermi, Elektron dalam medan magnet seragam, dan Resonansi siklotron |

Indikator :

- Memahami konsep hole dan massa efektif
- Menjabarkan konstruksi permukaan Fermi
- Memahami dan menjelaskan Elektron dalam medan magnet seragam
- Menjelaskan resonansi siklotron
- Memprediksi rapat pembawa muatan ekstrinsik
- Menjelaskan Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur
- Memahami efek Hall
- Menjelaskan sambungan  $p-n$
- Menjabarkan efek termoelektrik

Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini:

- Mahasiswa mampu memahami konsep hole dan massa efektif
- Mahasiswa mampu menjabarkan konstruksi permukaan Fermi
- Mahasiswa mampu memahami dan menjelaskan Elektron dalam medan magnet seragam
- Mahasiswa mampu menjelaskan resonansi siklotron
- Mahasiswa mampu memprediksi rapat pembawa muatan ekstrinsik
- Mahasiswa mampu menjelaskan Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur
- Mahasiswa mampu memahami efek Hall
- Mahasiswa mampu menjelaskan sambungan  $p-n$
- Mahasiswa mampu menjabarkan efek termoelektrik

Materi Pokok (Bahan Kajian):

- Konsep hole
- Massa efektif

- Konstruksi permukaan Fermi
- Elektron dalam medan magnet seragam
- Resonansi siklotron
- Rapat pembawa muatan ekstrinsik
- Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur
- Efek Hall
- Sambungan p-n
- Efek termoelektrik

Minggu ke 9

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|---|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Konsekuensi dari periodisitas, Interpretasi gelombang mekanik dalam pita energi, Model Kronig-Penney, Model elektron hampir bebas, Skema zona pita energi, Pita energi dalam potensial periodic, Isolator, semikonduktor dan konduktor</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Konsep hole</li> <li>2) Massa efektif</li> <li>3) Konstruksi permukaan Fermi</li> <li>4) Elektron dalam medan magnet seragam</li> <li>5) Resonansi siklotron</li> </ol> </li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 3<br>Buku 4    | Tes tertulis |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|--|--|---------------|---|-----------|
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-10 terkait dengan materi Semikonduktor</li> </ul> | Metode: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul> | 10 menit      | Buku 4                                  | Tugas 9   |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Energi yang berdekatan dengan ujung pita valensi pada suatu kristal dinyatakan sebagai:

$$E = -AK^2$$

Dimana  $A = 10^{-39} \text{ Jm}^2$ . Sebuah elektron dengan vektor gelombang  $\mathbf{k} = 10^{10} \text{ k}_x \text{ m}^{-1}$  telah terhapus dari orbital pada pita valensi yang terisi penuh. Tentukan massa efektif, kecepatan, momentum dan energi hole.

2. Dalam pita energi elektron bergerak dalam bentuk paket gelombang, akibat pengaruh medan listrik  $\vec{\xi}$ . Buktikan bahwa persamaan gerak elektron tersebut dinyatakan dalam bentuk :

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{F}$$

3. Buktikan bahwa jumlah orbital per satuan energi pada tingkat energi Fermi adalah merupakan jumlah total elektron konduksi dibagi dengan energi Fermi, secara matematis dinyatakan sebagai :

$$D(\epsilon) \equiv \frac{dN}{d\epsilon} = \frac{3N}{2\epsilon}$$

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

|  |  |
|--|--|
| Program Studi  | : Fisika   |
| Mata Kuliah  | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah                                       | : 190700603W001  |
| Semester/sks   | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu                                     | : 10 - 11 / 2 x 3 x 50 menit   |
| Dosen Pengampu   | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK   | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari  |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK)                            | : Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor  |
| Deskripsi Mata Kuliah                                  | : Mata kuliah ini membahas tentang Pengelompokan semikonduktor, Struktur pita energi, Rapat pembawa muatan intrinsik, Semikonduktor ekstrinsik, dan Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang  |
| Indikator  | : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami dan mengklasifikasikan pengelompokan semikonduktor</li> <li>• Memahami dan menjabarkan struktur pita energi</li> <li>• Menjelaskan rapat pembawa muatan intrinsik</li> <li>• Menjelaskan dan menentukan semikonduktor ekstrinsik</li> <li>• Memprediksi Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul>   |
| Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini: | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami dan mengklasifikasikan pengelompokan semikonduktor</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami dan menjabarkan struktur pita energi</li> <li>• Mahasiswa mampu menjelaskan rapat pembawa muatan intrinsik</li> <li>• Mahasiswa mampu menjelaskan dan menentukan semikonduktor ekstrinsik</li> <li>• Mahasiswa mampu memprediksi Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul> |
| Materi Pokok (Bahan Kajian):                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pengelompokan semikonduktor</li> <li>• Struktur pita energi</li> <li>• Rapat pembawa muatan intrinsic</li> <li>• Semikonduktor ekstrinsik</li> <li>• Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul>   |

Minggu ke 10

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran   | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media        | Penilaian    |
|----|-------|---|---|---------------|--|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Konsep hole, Massa efektif, Konstruksi permukaan Fermi, Elektron dalam medan magnet seragam, dan Resonansi siklotron</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>  | 10 menit      |  |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :<br/>               1) Pengelompokan semikonduktor<br/>               2) Struktur pita energi<br/>               3) Rapat pembawa muatan intrinsic<br/>               4) Semikonduktor ekstrinsik<br/>               5) Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Pendekatan:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Problem Based Learning (PBL)</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 3<br>Buku 4<br>Buku 5 | Tes tertulis |
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul>   | 10 menit      | Buku 4   | Tugas 10     |

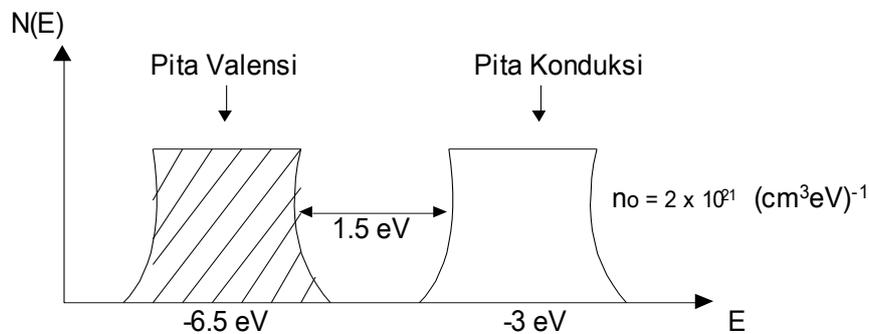
| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|--|---------------------------|---------------|---|-----------|
|    |       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menginformasikan materi pertemuan ke-11 terkait dengan lanjutan materi Semikonduktor</li> </ul> |                           |               |   |           |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmarr and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Tinjau suatu semikonduktor intrinsik dengan fungsi rapat keadaan  $N(E)$  seperti yang ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :
  - a. Dimana tingkat energi Fermi terhadap pita valensi dan pita konduksi ?
  - b. Hitung kerapatan elektron dalam pita konduksi pada temperatur kamar ?.



2. Sebuah SK Intrinsik (kristal Si) didoping dengan  $10^{16}$  atom/cm<sup>3</sup> Arsenik (As). Tentukan konsentrasi pembawa dan tingkat energi Fermi pada temperatur kamar dan gambarkan diagram energinya!
3. Kristal Silikon dengan energi gap  $\epsilon_G = 1.14$  eV, massa efektif hole diambil  $m_h = 0.3m$  dan massa efektif elektron  $m_e = 0.2m$ 
  - a. Turunkan pernyataan untuk fungsi  $f(T)$  dalam hukum aksi massa :

$$np = f(T)$$

dimana n dan p konsentrasi elektron dan hole, serta T suhu. (Gunakan

$$\int_0^{\infty} x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{2}} )$$

- b. Konsentrasi  $N_D$  dari donor pentavalent As harus ditambahkan untuk menghasilkan konduktivitas ekstrinsik  $10^4$  kali lebih besar dari konduktivitas intrinsiknya pada temperatur kamar ? . (abaikan pengotor akseptor).

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

Minggu ke 11

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran   | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media        | Penilaian    |
|----|-------|---|---|---------------|--|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Pengelompokan semikonduktor, Struktur pita energi, Rapat pembawa muatan intrinsic, Semikonduktor ekstrinsik, dan Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>  | 10 menit      |  |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :                             <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Rapat pembawa muatan ekstrinsik</li> <li>2) Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur</li> <li>3) Efek Hall</li> <li>4) Sambungan p-n</li> <li>5) Efek termoelektrik</li> </ol> </li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>  | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Pendekatan:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Problem Based Learning (PBL)</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 3<br>Buku 4<br>Buku 5 | Tes tertulis |
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>  | 10 menit      | Buku 4   | Tugas 11     |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran                                     | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|---|---|---------------|---|-----------|
|    |       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-12 terkait dengan 1 sifat kemagnetan bahan</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penugasan</li> </ul> |               |   |           |

### Referensi:

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

### Soal :

1. Dalam semikonduktor tipe-n, hubungan  $E$  terhadap  $k$  untuk elektron dalam pita konduksi dinyatakan sebagai :

$$E = ak^2 + C \quad ; C \text{ konstanta}$$

resonansi siklotron untuk elektron dalam medan magnet  $B = 0.1 \text{ Wb} / \text{m}^2$  terjadi frekuensi angular  $\omega_c = 1.8 \times 10^{11} \text{ rads}^{-1}$ .

- a. Tentukan nilai  $a$
  - b. Dengan mengasumsikan bahwa semikonduktor didoping dengan donor pentavalent. Perkirakan jumlah donor per  $\text{m}^3$  diberikan koefisien Hall pada suhu kamar  $R_H = 6.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{C}^{-1}$
2. Sebuah semikonduktor didoping dengan ketidamurnian Fosfor sebanyak  $10^{16}$  atom/ $\text{cm}^3$  sehingga dihasilkan semikonduktor tipe-n. Turunkan pernyataan untuk menyatakan resistivitas semikonduktor tipe-n tersebut dan berapa besar resistivitas bahan tersebut pada suhu kamar !
  3. Turunkan pernyataan untuk koefisien Hall bagi semikonduktor intrinsik dalam bentuk mobilitas elektron dan hole, serta kerapatan pembawa muatan ?
  4. Germanium (Ge) merupakan semikonduktor intrinsik dengan rapat muatan  $2.4 \times 10^{19}$  muatan per  $\text{m}^3$  pada temperatur 300 K. Bahan tersebut akan dibuat jenis semikonduktor ekstrinsik dengan menambahkan ketidamurnian p Indium pada laju atom Indium sekitar  $4 \times 10^8$  per atom Germanium. Jika terdapat sekitar  $4.4 \times 10^{28}$  atom Germanium per  $\text{m}^3$ , maka tentukan konsentrasi pembawa muatan minoritasnya dan bahas hasilnya!

### Lampiran

1. Materi Pembelajaran

|  |   |
|--|---|
| Program Studi  | : Fisika  |
| Mata Kuliah  | : Fisika Zat Padat  |
| Kode Mata Kuliah                                       | : 190700603W001   |
| Semester/sks   | : VI (Enam) / 3 SKS   |
| Pertemuan Ke/Waktu                                     | : 12 / 1 x 3 x 50 menit   |
| Dosen Pengampu   | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si  |
| CPMK   | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari   |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK)                            | : Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan   |
| Deskripsi Mata Kuliah                                  | : Mata kuliah ini membahas tentang Terminologi kemagnetan bahan, Tipe-tipe kemagnetan bahan, Diamagnetisme, dan Paramagnetisme  |
| Indikator  | : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>• Mengklasifikasikan tipe - tipe kemagnetan bahan</li> <li>• Membedakan sifat Ferromagnetisme, Anti-ferromagnetisme, dan Ferrimagnetisme</li> </ul>   |
| Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini: | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>• Mahasiswa mampu mengklasifikasikan tipe - tipe kemagnetan bahan</li> <li>• Mahasiswa mampu membedakan sifat Ferromagnetisme, Anti-ferromagnetisme, dan Ferrimagnetisme</li> </ul> |
| Materi Pokok (Bahan Kajian):                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>• Tipe-tipe kemagnetan bahan</li> <li>• Diamagnetisme</li> <li>• Paramagnetisme</li> </ul>   |

Minggu ke 12

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|---|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Rapat pembawa muatan ekstrinsik, Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperature, Efek Hall, Sambungan p-n, dan Efek termoelektrik</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :<br/>               1) Terminologi kemagnetan bahan<br/>               2) Tipe-tipe kemagnetan bahan<br/>               3) Diamagnetisme<br/>               4) Paramagnetisme</li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 3              | Tes tertulis |
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-13 terkait dengan materi aplikasi konsep</li> </ul>  | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul>  | 10 menit      | Buku 2                                  | Tugas 12     |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran | Metode/Model Pembelajaran | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|-----------------------|---------------------------|---------------|---|-----------|
|    |       | dielektrik            |                           |               |   |           |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Jelaskan klasifikasi bahan magnetik berdasarkan harga suseptibilitas magnetik ( $\chi = M/B$ ) dan sebutkan beberapa contohnya !
2. Jika kristal besi termagnetisasi total secara spontan, perkirakan hasil magnetisasi tersebut dengan menggunakan nilai-nilai yang sesuai :  $\rho_{besi} = 7.9$  (berat spesifik), berat atom besi (A) = 56 dan bilangan Avogadro ( $N_A$ ) =  $6.02 \times 10^{23}$  !.
3. Sebuah elektron bersirkulasi dalam medan magnetik dengan  $B = 2.0T$  yang bekerja secara tegak lurus pada bidang lintasan. Hitunglah perubahan momen magnetiknya !.
4. Tinjau gas elektron konduksi pada suhu nol mutlak dalam medan magnetik lemah  $B$  . Jika konsentrasi spin up  $N_+$  dan spin down  $N_-$  elektron dapat diparameterisasi oleh kuantitas  $x$  , maka :

$$N_+ = \frac{1}{2} N(1 + x), \quad N_- = \frac{1}{2} N(1 - x)$$

dimana  $N$  jumlah total elektron. Buktikanlah bahwa suseptibilitas magnetik

$\chi = M/B$  dapat dinyatakan sebagai :

$$\chi = \frac{3n\mu_B^2}{2E_F}$$

5. Apa yang dimaksud dengan harga jenuh spesifik untuk kerapatan magnetisasi dari besi/baja (satuan keadaan)?. Dari harga ini dan harga spesifik lainnya, perkirakan momen magnetik spin intrinsik elektron untuk keadaan feromagnetisme !.

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

|  |  |
|--|--|
| Program Studi  | : Fisika   |
| Mata Kuliah  | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah                                       | : 190700603W001  |
| Semester/sks   | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu                                     | : 13 / 1 x 3 x 50 menit  |
| Dosen Pengampu   | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK   | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari  |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK)                            | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik  |
| Deskripsi Mata Kuliah                                  | : Mata kuliah ini membahas tentang Polarisasi, Konstanta dielektrik, Medan listrik lokal, Polarisabilitas dielektrik dan sumbernya, Rugi-rugi dielektrik, Fenomena optik, Aplikasi Plasma, dan Aplikasi mode fonon pada kristal ionik  |
| Indikator  | : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami konsep polarisasi</li> <li>• Memperkirakan konstanta dielektrik</li> <li>• Menjelaskan pengaruh medan listrik lokal</li> <li>• Memahami polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>• Mengidentifikasi rugi-rugi dielektrik</li> <li>• Menjelaskan fenomena optik</li> <li>• Memahami aplikasi plasma</li> <li>• Memahami mode fonon pada kristal ionic</li> </ul>   |
| Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini: | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mahasiswa mampu memahami konsep polarisasi</li> <li>• Mahasiswa mampu memperkirakan konstanta dielektrik</li> <li>• Mahasiswa mampu menjelaskan pengaruh medan listrik lokal</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>• Mahasiswa mampu mengidentifikasi rugi-rugi dielektrik</li> <li>• Mahasiswa mampu menjelaskan fenomena optik</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami aplikasi plasma</li> <li>• Mahasiswa mampu memahami mode fonon pada kristal ionic</li> </ul> |
| Materi Pokok (Bahan Kajian):                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polarisasi</li> <li>• Konstanta dielektrik</li> <li>• Medan listrik lokal</li> <li>• Polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>• Rugi-rugi dielektrik</li> </ul>  |

- Fenomena optic
- Aplikasi Plasma
- Aplikasi mode fonon pada kristal ionik

Minggu ke 13

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|--|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Terminologi kemagnetan bahan, Tipe-tipe kemagnetan bahan, Diamagnetisme, dan Paramagnetisme</li> </ul>                                       | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Polarisasi</li> <li>2) Konstanta dielektrik</li> <li>3) Medan listrik lokal</li> <li>4) Polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>5) Rugi-rugi dielektrik</li> <li>6) Fenomena optic</li> <li>7) Aplikasi Plasma</li> <li>8) Aplikasi mode fonon pada kristal ionik</li> </ol> </li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 3<br>Buku 5    | Tes tertulis |
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> </ul>  | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      | Buku 3                                  | Tugas 13     |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran                                     | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|---|---|---------------|---|-----------|
|    |       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-14 terkait dengan materi klasifikasi tentang konsep superkonduktivitas</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penugasan</li> </ul> |               |   |           |

### Referensi:

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

### Soal :

1. Buktikan bahwa konstanta dielektrik sebagai fungsi  $\omega$  untuk elektron bebas gas dengan kerapatan  $n$  dinyatakan sebagai :

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

dengan :  $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$

Jika volume sel satuan primitif logam Na  $35 \times 10^{-30} \text{ m}^3$ , hitunglah panjang gelombang pancung (cuttof) logam Na tersebut!

2. Tentukan persentasi polarisabilitas ionik dari kristal NaCl dengan indeks bias optik dan konstanta dielektrik masing-masing 1.5 dan 5.6!
3. Asumsikan bahwa terdapat sekitar  $10^{27}$  molekul HCl/ $\text{m}^3$ , maka tentukan orientasi polarisasi pada temperatur ruang jika HCl ini berada di bawah pengaruh medan listrik sebesar  $10^6 \text{ V/m}$ . Momen dipol molekul HCl sekitar  $3.46 \times 10^{-30} \text{ C}\cdot\text{m}$ . Tunjukkan bahwa pada temperatur dan medan tinggi ini, nilai  $a (=pE/kT)$  sangat kecil.
4. Jelaskan fenomena polarisasi alamiah dari bahan ferroelektrik!
5. Buktikan bahwa konstanta dielektrik sebagai fungsi  $\omega$  untuk elektron bebas gas dengan kerapatan  $n$  dinyatakan sebagai :

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

dengan :  $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$

Jika volume sel satuan primitif logam Na  $35 \times 10^{-30} \text{ m}^3$ , hitunglah panjang gelombang pancung (cuttof) logam Na tersebut !.

### Lampiran

1. Materi Pembelajaran

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Program Studi               | : Fisika   |
| Mata Kuliah                 | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah            | : 190700603W001  |
| Semester/sks                | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu          | : 14 / 1 x 3 x 50 menit  |
| Dosen Pengampu              | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK                        | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari  |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK) | : Mahasiswa mampu mengklasifikasikan tentang konsep superkonduktivitas   |
| Deskripsi Mata Kuliah       | : Mata kuliah ini membahas tentang Pendahuluan dan sejarah perkembangan, Resistivitas listrik, Efek Meissner, Arus-super dan kedalaman penetrasi, Superkonduktor tipe I dan II, Sifat termodinamik dan optik, Efek isotop, Efek Josephson, Teori BCS, dan Aplikasi |

Indikator :

- Menjelaskan sejarah perkembangan superkonduktivitas
- Memahami resistivitas listrik
- Memahami efek Meissner
- Memahami Arus-super dan kedalaman penetrasi
- Mengklasifikasikan Superkonduktor tipe I dan II
- Memahami Sifat termodinamik dan optik
- Menjelaskan efek isotop dan Josephson
- Memahami teori BCS
- Memberi contoh aplikasi superkonduktor

Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini:

- Mahasiswa mampu menjelaskan sejarah perkembangan superkonduktivitas
- Mahasiswa mampu memahami resistivitas listrik
- Mahasiswa mampu memahami efek Meissner
- Mahasiswa mampu memahami Arus-super dan kedalaman penetrasi
- Mahasiswa mampu mengklasifikasikan Superkonduktor tipe I dan II
- Mahasiswa mampu memahami Sifat termodinamik dan optik
- Mahasiswa mampu menjelaskan efek isotop dan Josephson
- Mahasiswa mampu memahami teori BCS
- Mahasiswa mampu memberi contoh aplikasi superkonduktor

Materi Pokok (Bahan Kajian):

- Pendahuluan dan sejarah perkembangan
- Resistivitas listrik

- Efek Meissner
- Arus-super dan kedalaman penetrasi
- Superkonduktor tipe I dan II
- Sifat termodinamik dan optic
- Efek isotop
- Efek Josephson
- Teori BCS
- Aplikasi

Minggu ke 14

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|---|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Polarisasi, Konstanta dielektrik, Medan listrik lokal, Polarisabilitas dielektrik dan sumbernya, Rugi-rugi dielektrik, Fenomena optic, Aplikasi Plasma, Aplikasi mode fonon pada kristal ionik</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Pendahuluan dan sejarah perkembangan</li> <li>2) Resistivitas listrik</li> <li>3) Efek Meissner</li> <li>4) Arus-super dan kedalaman penetrasi</li> <li>5) Superkonduktor tipe I dan II</li> <li>6) Sifat termodinamik dan optic</li> <li>7) Efek isotop</li> <li>8) Efek Josephson</li> <li>9) Teori BCS</li> </ol> </li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 4<br>Buku 5    | Tes tertulis |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran   | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|--|---|---------------|---|-----------|
|    |       | 10) Aplikasi<br>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan  |   |               |   |           |
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-15 terkait dengan materi onsep Nano-Material</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul> | 10 menit      | Buku 4                                  | Tugas 14  |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Jelaskan perbedaan antara Superkonduktor tipe I dan superkonduktor tipe II.
2. Hitung kerapatan elektron superkonduktif Merkuri pada 3.5 K, jika diberikan temperatur transisi Merkuri 4.22 K.
3. Kedalaman penetrasi London untuk suatu sampel pada 6 K dan 7 K adalah 41.2 nm dan 183.0 nm. Hitung temperatur transisi selama kedalaman penetrasi pada 0 K.
4. Diketahui temperatur kritis  $T_C$  untuk Hg dengan massa isotop 199.5 adalah 4.185 K. Hitung temperatur kritisnya pada saat massa isotop berubah menjadi 203.4.
5. Hitung rapat arus kritis untuk kawat dengan diameter 1 mm pada 4.2 K. Asumsikan bahwa intensitas medan magnetik kritis bergantung pada temperatur ( $T$ ). Diberikan  $T_C$  untuk timah 7.18 K dan  $H_C(0)$  adalah  $6.5 \times 10^4$  A/m.

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Program Studi               | : Fisika   |
| Mata Kuliah                 | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah            | : 190700603W001  |
| Semester/sks                | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Pertemuan Ke/Waktu          | : 15 / 1 x 3 x 50 menit  |
| Dosen Pengampu              | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si   |
| CPMK                        | : Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari-hari                                |
| Kemampuan Khusus (sub CPMK) | : Mahasiswa mampu memahami konsep Nano-Material  |
| Deskripsi Mata Kuliah       | : Mata kuliah ini membahas tentang Pendahuluan, Nano-partikel, Nano-struktur, Silikon berporos, dan Teknik Fabrikasi |

Indikator :

- Memahami pengertian nano-partikel dan nano-struktur
- Menjelaskan dan menggambarkan sifat silikon berporos
- Menjabarkan teknik fabrikasi

Tujuan Pembelajaran, Setelah menempuh perkuliahan ini:

- Mahasiswa mampu memahami pengertian nano-partikel dan nano-struktur
- Mahasiswa mampu menjelaskan dan menggambarkan sifat silikon berporos
- Mahasiswa mampu menjabarkan teknik fabrikasi

Materi Pokok (Bahan Kajian):

- Pendahuluan
- Nano-partikel
- Nano-struktur
- Silikon berporos
- Teknik Fabrikasi

Minggu ke 15

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran  | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian    |
|----|-------|--|--|---------------|---|--------------|
| 1  | Awal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengucapkan salam</li> <li>• Menginformasikan materi pokok yang akan diajarkan</li> <li>• Menjelaskan tujuan pembelajaran</li> <li>• Menjelaskan metode pembelajaran yang diterapkan</li> <li>• Apersepsi : meminta mahasiswa untuk mengingat kembali materi pertemuan sebelumnya terkait dengan Pendahuluan dan sejarah perkembangan, Resistivitas listrik, Efek Meissner, Arus-super dan kedalaman penetrasi, Superkonduktor tipe I dan II, Sifat termodinamik dan optic, Efek isotop, Efek Josephson, Teori BCS, dan Aplikasi</li> </ul> | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> </ul>   | 10 menit      |   |              |
| 2  | Inti  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan tentang :<br/>               1) Pendahuluan<br/>               2) Nano-partikel<br/>               3) Nano-struktur<br/>               4) Silikon berporos<br/>               5) Teknik Fabrikasi</li> <li>• Memberi contoh soal terkait materi yang diajarkan</li> </ul>   | Metode:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Latihan</li> </ul> Model:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | 130 menit     | Buku 1<br>Buku 2<br>Buku 4<br>Buku 5    | Tes tertulis |

| No | Tahap | Kegiatan Pembelajaran   | Metode/Model Pembelajaran  | Alokasi waktu | Sumber Belajar/<br>Bahan Ajar/<br>Media | Penilaian |
|----|-------|---|--|---------------|---|-----------|
| 3  | Akhir | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meminta mahasiswa merangkum materi yang sudah diajarkan</li> <li>• Memberikan tugas mandiri</li> <li>• Menginformasikan materi pertemuan ke-16 adalah akan dilakukan Ujian Akhir Semester (UAS)</li> </ul> | Metode: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Penugasan</li> </ul> | 10 menit      | Buku 4                                  | Tugas 14  |

**Referensi:**

1. Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
2. Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
3. Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
4. Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
5. Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

**Soal :**

1. Gambarkan secara singkat dan jelas tentang struktur dan sifat-sifat partikel-nano.
2. Jelaskan struktur dan sifat karbon nano-tube (CNT)
3. Jelaskan bagaimana Kuantum Dot (Quantum Dot) dihasilkan berdasarkan struktur, sifat-sifat karakteristik, dan aplikasinya.
4. Jelaskan prinsip kerja Atomic Force Microscopy (AFM)

**Lampiran**

1. Materi Pembelajaran

## 2.6 KONTRAK PERKULIAHAN

### DESKRIPSI MATA KULIAH

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Perguruan Tinggi      | : Universitas Mulawarman   |
| Fakultas              | : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam                    |
| Program Studi         | : Fisika   |
| Mata Kuliah           | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah      | : 190704603W034  |
| Semester/sks          | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Mata Kuliah Prasyarat | : Fisika Kuantum, Fisika Modern, Listrik Magnet                    |
| Nama Dosen            | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si |

### 1. MANFAAT MATA KULIAH

Mata kuliah ini memberikan manfaat bagi mahasiswa sebagai dasar untuk mempelajari mata kuliah pada semester berikutnya seperti mata kuliah Fisika Semikonduktor dan mata kuliah lainnya yang berhubungan dengan kelompok bidang keahlian fisika teori dan material.

### 2. DESKRIPSI PERKULIAHAN

Fisika Zat Padat diperlukan untuk mengetahui berbagai sifat dan perilaku zat yang berada pada fase padat. Sifat dan perilaku zat mampu dianalisis dengan mempertimbangkan unsur-unsur internal yang berupa kesetangkapan dan keberkalaan kedudukan atom-atom dan gugus atom dalam ruang.

### 3. CPMK

Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep Fisika Zat Padat dalam kehidupan sehari - hari

### 4. STRATEGI PERKULIAHAN

Metode perkuliahan yang digunakan antara lain metode ceramah, diskusi, tugas dan latihan. Adapun model pembelajaran yang digunakan adalah model *Direct Instruction* kecuali pertemuan 10 dan 11, dimana pada pertemuan tersebut digunakan pendekatan pembelajaran *Problem Based Learning (PBL)*. Mahasiswa wajib mengikuti perkuliahan minimal 80 persen. Perkuliahan dilakukan secara *offline* dan *online* dengan tim pengajar 2 orang dosen.

## 5. KOMPONEN PERKULIAHAN

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)  | Indikator  | Materi Pokok (Bahan Kajian)   | Metode/Model Pembelajaran   | Referensi            |
|---------------|--|--|---|---|----------------------|
| 1             | Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan struktur kristal dan sel satuan</li> <li>Memahami operasi simetri</li> <li>Mengidentifikasi tipe-tipe kristal</li> <li>Menjelaskan arah kisi dan bidang kristal</li> <li>Memahami grup titik dan ruang kristal</li> <li>Membedakan struktur kristal tertentu</li> <li>Memahami kuasi-kristal</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Dasar-dasar struktur kristal</li> <li>Sel satuan: struktur sel primitive</li> <li>Operasi simetri</li> <li>Tipe-tipe kristal</li> <li>Arah kisi dan bidang kisi</li> <li>Grup titik dan ruang kristal</li> <li>Struktur kristal tertentu</li> <li>Kuasi kristal</li> </ul> | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 3, 4    |
| 2             | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep ikatan kristal   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan kohesi atom</li> <li>Membedakan ikatan atom utama dan sekunder</li> <li>Menjelaskan energi kohesif</li> <li>Memperkirakan konstanta elastik kristal</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kohesi atom</li> <li>Ikatan atom utama</li> <li>Ikatan atom sekunder</li> <li>Energi kohesif</li> <li>Konstanta elastik kristal</li> <li>Gelombang elastik pada kristal kubik</li> </ul>   | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 4       |
| 3             | Mahasiswa mampu menginterpretasikan tentang konsep kisi resiprok dan penentuan striuktur kristal | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami kisi resiprok</li> <li>Menjelaskan hukum Bragg</li> <li>Menjelaskan Hubungan antara <b>a, b, c</b> dengan <b>a*, b*, c*</b></li> <li>Menginterpretasikan pengukuran pola difraksi kristal</li> <li>Memperkirakan konstanta kisi</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kisi resiprok</li> <li>Hukum Bragg</li> <li>Konstruksi kisi resiprok</li> <li>Hubungan antara <b>a, b, c</b> dengan <b>a*, b*, c*</b></li> <li>Pengukuran pola difraksi kristal</li> <li>Penentuan konstanta kisi</li> </ul>   | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 3, 4    |
| 4             | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep vibrasi kristal  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami model harmonik kristal</li> <li>Menjelaskan mode normal rantai monoatomik dan diatomik 1D</li> <li>Memahami kuantisasi vibrasi kisi</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Model harmonik kristal</li> <li>Mode normal rantai monoatomik 1D</li> <li>Mode normal rantai diatomik 1D</li> <li>Teori umum pendekatan harmonic</li> <li>Kuantisasi vibrasi kisi</li> </ul>   | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 3, 4, 5 |
| 5             | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Membedakan kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik dan kuantum</li> <li>Memahami efek tak-harmonik</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik</li> <li>Kapasitas panas berdasarkan tinjauan kuantum</li> <li>Efek tak-harmonik (un-harmonic)</li> </ul>  | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 3, 4, 5 |

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)  | Indikator  | Materi Pokok (Bahan Kajian)  | Metode/Model Pembelajaran   | Referensi         |
|---------------|--|--|--|---|-------------------|
| 6             | Mahasiswa mampu memahami tentang teori elektron bebas pada logam       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami dan menjelaskan model Drude</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>• Memahami dan menerapkan Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Model Sommerfeld</li> <li>• Memahami kapasitas panas elektron</li> <li>• Menerapkan teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Aturan Matthiessen</li> <li>• Mengidentifikasi bahan termoelektrik</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Model Drude</li> <li>• Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>• Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>• Model Sommerfeld</li> <li>• Kapasitas panas elektron</li> <li>• Teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>• Aturan Matthiessen</li> <li>• Bahan termoelektrik</li> </ul>    | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 3, 4    |
| 7             | Mahasiswa mampu memahami konsep pita energi elektron                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami Konsekuensi dari periodisitas</li> <li>• Mengintrepretasikan gelombang mekanik dalam pita energi</li> <li>• Menjelaskan model Kronig-Penney</li> <li>• Menjelaskan model elektron hampir bebas</li> <li>• Memahami skema zona pita energi</li> <li>• Menjelaskan Pita energi dalam potensial periodik</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsekuensi dari periodisitas</li> <li>• Interpretasi gelombang mekanik dalam pita energi</li> <li>• Model Kronig-Penney</li> <li>• Model elektron hampir bebas</li> <li>• Skema zona pita energi</li> <li>• Pita energi dalam potensial periodic</li> <li>• Isolator, semikonduktor dan konduktor</li> </ul> | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 3, 4    |
| 8             | <b>UJIAN TENGAH SEMESTER (UTS)</b>                                     |  |  |   |                   |
| 9             | Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami konsep hole dan massa efektif</li> <li>• Menjabarkan konstruksi permukaan Fermi</li> <li>• Memahami dan menjelaskan Elektron dalam medan magnet seragam</li> <li>• Menjelaskan resonansi siklotron</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsep hole</li> <li>• Massa efektif</li> <li>• Konstruksi permukaan Fermi</li> <li>• Elektron dalam medan magnet seragam</li> <li>• Resonansi siklotron</li> </ul>   | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 3, 4 |

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)                             | Indikator  | Materi Pokok (Bahan Kajian)  | Metode/Model Pembelajaran  | Referensi            |
|---------------|---|--|--|--|----------------------|
| 10 - 11       | Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami dan mengklasifikasikan pengelompokan semikonduktor</li> <li>Memahami dan menjabarkan struktur pita energi</li> <li>Menjelaskan rapat pembawa muatan intrinsik</li> <li>Menjelaskan dan menentukan semikonduktor ekstrinsik</li> <li>Memprediksi Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pengelompokan semikonduktor</li> <li>Struktur pita energi</li> <li>Rapat pembawa muatan intrinsik</li> <li>Semikonduktor ekstrinsik</li> <li>Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul>   | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Pendekatan pembelajaran</li> <li><i>Problem Based Learning (PBL)</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 3, 4, 5 |
|               |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memprediksi rapat pembawa muatan ekstrinsik</li> <li>Menjelaskan Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur</li> <li>Memahami efek Hall</li> <li>Menjelaskan sambungan <i>p-n</i></li> <li>Menjabarkan efek termoelektrik</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rapat pembawa muatan ekstrinsik</li> <li>Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur</li> <li>Efek Hall</li> <li>Sambungan <i>p-n</i></li> <li>Efek termoelektrik</li> </ul>   | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Pendekatan pembelajaran</li> <li><i>Problem Based Learning (PBL)</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 3, 4, 5 |
| 12            | Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>Mengklasifikasikan tipe - tipe kemagnetan bahan</li> <li>Membedakan sifat Ferromagnetisme, Anti-ferromagnetisme, dan Ferrimagnetisme</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>Tipe-tipe kemagnetan bahan</li> <li>Diamagnetisme</li> <li>Paramagnetisme</li> </ul>  | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul>                | Buku : 1, 2, 3       |
| 13            | Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami konsep polarisasi</li> <li>Memperkirakan konstanta dielektrik</li> <li>Menjelaskan pengaruh medan listrik lokal</li> <li>Memahami polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>Mengidentifikasi rugi-rugi dielektrik</li> <li>Menjelaskan fenomena optik</li> <li>Memahami aplikasi plasma</li> <li>Memahami mode fonon pada kristal ionik</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Polarisasi</li> <li>Konstanta dielektrik</li> <li>Medan listrik lokal</li> <li>Polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>Rugi-rugi dielektrik</li> <li>Fenomena optik</li> <li>Aplikasi Plasma</li> <li>Aplikasi mode fonon pada kristal ionik</li> </ul> | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi</li> <li>Tugas/Latihan Model pembelajaran</li> <li><i>Direct Instruction</i></li> </ul>                | Buku : 1, 2, 3, 5    |

| Pertemuan Ke- | Kemampuan Khusus (Sub-CPMK)  | Indikator  | Materi Pokok (Bahan Kajian)   | Metode/Model Pembelajaran  | Referensi         |
|---------------|--|--|---|--|-------------------|
| 14            | Mahasiswa mampu mengklasifikasikan tentang konsep superkonduktivitas | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Menjelaskan sejarah perkembangan superkonduktivitas</li> <li>• Memahami resistivitas listrik</li> <li>• Memahami efek Meissner</li> <li>• Memahami Arus-super dan kedalaman penetrasi</li> <li>• Mengklasifikasikan Superkonduktor tipe I dan II</li> <li>• Memahami Sifat termodinamik dan optik</li> <li>• Menjelaskan efek isotop dan Josephson</li> <li>• Memahami teori BCS</li> <li>• Memberi contoh aplikasi superkonduktor</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendahuluan dan sejarah perkembangan</li> <li>• Resistivitas listrik</li> <li>• Efek Meissner</li> <li>• Arus-super dan kedalaman penetrasi</li> <li>• Superkonduktor tipe I dan II</li> <li>• Sifat termodinamik dan optik</li> <li>• Efek isotop</li> <li>• Efek Josephson</li> <li>• Teori BCS</li> <li>• Aplikasi</li> </ul> | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Tugas/Latihan</li> </ul> Model pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 3, 4 |
| 15            | Mahasiswa mampu memahami konsep Nano-Material                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memahami pengertian nano-partikel dan nano-struktur</li> <li>• Menjelaskan dan menggambarkan sifat silikon berporos</li> <li>• Menjabarkan teknik fabrikasi</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendahuluan</li> <li>• Nano-partikel</li> <li>• Nano-struktur</li> <li>• Silikon berporos</li> <li>• Teknik Fabrikasi</li> </ul>   | Metode Pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ceramah</li> <li>• Diskusi</li> <li>• Tugas/Latihan</li> </ul> Model pembelajaran <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Direct Instruction</i></li> </ul> | Buku : 1, 2, 4, 5 |
| 16            | <b>UJIAN AKHIR SEMESTER (UAS)</b>                                    |  |   |  |                   |

## 6. TUGAS

Penugasan diberikan secara individu sesuai dengan materi yang diajarkan untuk setiap pertemuan. Tugas dikumpulkan 1 hari sebelum pertemuan berikutnya sejak tugas diberikan.

## 7. REFERENSI UTAMA

- 1) Roth, Siegmund and Carroll, David. 2019. Foundations of solid state physics dimensionality and symmetry. Wiley-VCH. United States
- 2) Sharma, K. K and Satyal, B. S. Solid State Physics . Kalyani Publishers. New Delhi
- 3) Singh, R. J. 2012. Solid State Physics. Pearson. New Delhi
- 4) Srivastava, J. P. 2009. Solid State Physics. PHI Learning Private Limited Edisi 2. New Delhi
- 5) Wahab, M. A. 2015. Solid State Physics Structure and Properties of Materials. Narosa Publishing House Edisi 3. New Delhi

## 8. TATA TERTIB

- 1) Peserta kuliah mematuhi tata tertib kehidupan kampus Universitas

Mulawarman

- 2) Mahasiswa wajib mengikuti kuliah 80%, jika tidak masuk 3 kali berturut-turut maka tidak diizinkan untuk mengikuti ujian.
- 3) Keterlambatan mahasiswa di toleransi hingga 15 menit, jika ada keterangan jelas maka diperbolehkan mengikuti perkuliahan jika terlambat 30 menit.
- 4) Perubahan jadwal kuliah oleh dosen harus konfirmasi pada mahasiswa paling lambat 1 hari sebelum perkuliahan dimulai.
- 5) Mahasiswa menggunakan pakaian formal dan sopan selama perkuliahan.

### 9. KOMPONEN PENILAIAN

Nilai akhir (NA) adalah nilai kumulatif dari nilai Ujian Tengah Semester (UTS), Ujian Akhir Semester (UAS), dan Nilai Afektif. Adapun bobot persentase masing – masing komponen penilain tersebut adalah Ujian Tengah Semester (45%), Ujian Akhir Semester (45%), dan Afektif (10%).

### 10. KRITERIA PENILAIAN

Penilaian akan dilaksanakan oleh 2 dosen dengan menggunakan penilaian Bobot Mata Kuliah berdasarkan Angka Mutu yang seperti pada Tabel berikut:

| Angka Mutu (AM)       | Nilai Bobot (NB) | Nilai Huruf (NH) |
|-----------------------|------------------|------------------|
| $0 \leq AM < 40$      | 0.0              | E                |
| $40 \leq AM < 50$     | 1.0              | D                |
| $50 \leq AM < 60$     | 1.5              |                  |
| $60 \leq AM < 65$     | 2.0              | C                |
| $65 \leq AM < 70$     | 2.5              |                  |
| $70 \leq AM < 75$     | 3.0              | B                |
| $75 \leq AM < 80$     | 3.5              |                  |
| $80 \leq AM \leq 100$ | 4.0              | A                |

### 11. JADWAL KULIAH

Hari : Senin  
Pukul : 08.00 – 10.30 WITA

## 2.7 RENCANA ASESMEN & EVALUASI (RA&E)

Perguruan Tinggi : Universitas Mulawarman  
 Fakultas : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
 Program Studi : Fisika  
 Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
 Kode Mata Kuliah : 190704603W034  
 Semester/sks : VI (Enam) / 3 SKS  
 Mata Kuliah Prasyarat : Fisika Kuantum, Fisika Modern, Listrik Magnet  
 Nama Dosen : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si  
 Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si

| Minggu Ke- | Kemampuan Khusus                                    | Indikator  | Butir Soal Evaluasi |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    | Bentuk Test/Non Test | Bobot (%)    |    |
|------------|---|--|---------------------|----|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----------------------|--------------|----|
|            |   |  | Kognitif            |    |    |    |    |    | Psikomotor |    |    |    |    | Afektif |    |    |    |                      |              |    |
|            |   |  | C1                  | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | P1         | P2 | P3 | P4 | P5 | A1      | A2 | A3 | A4 |                      |              | A5 |
| 1          | Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan struktur kristal dan sel satuan</li> <li>Memahami operasi simetri</li> <li>Mengidentifikasi tipe-tipe kristal</li> <li>Menjelaskan arah kisi dan bidang kristal</li> <li>Memahami grup titik dan</li> </ul> |                     | 1  | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      | Tes tertulis | 10 |

| Minggu Ke- | Kemampuan Khusus   | Indikator  | Butir Soal Evaluasi |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    | Bentuk Test/Non Test | Bobot (%) |              |   |
|------------|--|--|---------------------|----|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----------------------|-----------|--------------|---|
|            |  |  | Kognitif            |    |    |    |    |    | Psikomotor |    |    |    |    | Afektif |    |    |    |                      |           |              |   |
|            |  |  | C1                  | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | P1         | P2 | P3 | P4 | P5 | A1      | A2 | A3 | A4 |                      |           | A5           |   |
|            |  | ruang kristal<br>• Membedakan struktur kristal tertentu<br>• Memahami kuasi-kristal  |                     |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              |   |
| 2          | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep ikatan kristal   | • Menjelaskan kohesi atom<br>• Membedakan ikatan atom utama dan sekunder<br>• Menjelaskan energi kohesif<br>• Memperkirakan konstanta elastik kristal  |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | Tes tertulis | 6 |
| 3          | Mahasiswa mampu menginterpretasikan tentang konsep kisi resiprok dan penentuan striuktur kristal | • Memahami kisi resiprok<br>• Menjelaskan hukum Bragg<br>• Menjelaskan Hubungan antara <b>a, b, c</b> dengan <b>a*, b*, c*</b><br>• Menginterpretasikan pengukuran pola difraksi kristal<br>• Memperkirakan konstanta kisi |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | Tes tertulis | 6 |
| 4          | Mahasiswa mampu memahami   | • Memahami model harmonik kristal<br>• Menjelaskan mode  |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | Tes tertulis | 6 |

| Minggu Ke- | Kemampuan Khusus   | Indikator   | Butir Soal Evaluasi |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    | Bentuk Test/Non Test | Bobot (%) |              |    |
|------------|--|---|---------------------|----|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----------------------|-----------|--------------|----|
|            |  |   | Kognitif            |    |    |    |    |    | Psikomotor |    |    |    |    | Afektif |    |    |    |                      |           |              |    |
|            |  |   | C1                  | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | P1         | P2 | P3 | P4 | P5 | A1      | A2 | A3 | A4 |                      |           | A5           |    |
|            | tentang konsep vibrasi kristal                                     | normal rantai monoatomik dan diatomik 1D<br>• Memahami kuantisasi vibrasi kisi  |                     |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              |    |
| 5          | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan | • Membedakan kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik dan kuantum<br>• Memahami efek tak-harmonik  |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | Tes tertulis | 6  |
| 6          | Mahasiswa mampu memahami tentang teori elektron bebas pada logam   | • Memahami dan menjelaskan model Drude<br>• Memahami dan menjelaskan Modifikasi Lorentz pada Model Drude<br>• Memahami dan menerapkan Fungsi distribusi Fermi-Dirac<br>• Memahami dan menjelaskan Model Sommerfeld<br>• Memahami kapasitas panas elektron<br>• Menerapkan teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam |                     | 1  | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | Tes tertulis | 10 |

| Minggu Ke- | Kemampuan Khusus   | Indikator  | Butir Soal Evaluasi |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    | Bentuk Test/Non Test | Bobot (%) |              |              |   |
|------------|--|--|---------------------|----|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----------------------|-----------|--------------|--------------|---|
|            |  |  | Kognitif            |    |    |    |    |    | Psikomotor |    |    |    |    | Afektif |    |    |    |                      |           |              |              |   |
|            |  |  | C1                  | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | P1         | P2 | P3 | P4 | P5 | A1      | A2 | A3 | A4 |                      |           | A5           |              |   |
|            |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>logam</li> <li>Memahami dan menjelaskan Aturan Matthiessen</li> <li>Mengidentifikasi bahan termoelektrik</li> </ul>   |                     |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              |              |   |
| 7          | Mahasiswa mampu memahami konsep energi elektron pita                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami Konsekuensi dari periodisitas</li> <li>Menginterpretasikan gelombang mekanik dalam pita energi</li> <li>Menjelaskan model Kronig-Penney</li> <li>Menjelaskan model elektron hampir bebas</li> <li>Memahami skema zona pita energi</li> <li>Menjelaskan Pita energi dalam potensial periodik</li> </ul> |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | Tes tertulis | 6            |   |
| 8          | <b>UJIAN TENGAH SEMESTER</b>   |  |                     |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              |              |   |
| 9          | Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami konsep hole dan massa efektif</li> <li>Menjabarkan konstruksi permukaan Fermi</li> <li>Memahami dan menjelaskan Elektron</li> </ul>  |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              | Tes tertulis | 6 |

| Minggu Ke- | Kemampuan Khusus  | Indikator  | Butir Soal Evaluasi |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    | Bentuk Test/Non Test | Bobot (%) |         |         |
|------------|---|--|---------------------|----|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----------------------|-----------|---------|---------|
|            |   |  | Kognitif            |    |    |    |    |    | Psikomotor |    |    |    |    | Afektif |    |    |    |                      |           |         |         |
|            |   |  | C1                  | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | P1         | P2 | P3 | P4 | P5 | A1      | A2 | A3 | A4 |                      |           | A5      |         |
|            |   | <p>dalam medan magnet seragam</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan resonansi siklotron</li> </ul>  |                     |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |         |         |
| 10 - 11    | Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami dan mengklasifikasikan pengelompokan semikonduktor</li> <li>Memahami dan menjabarkan struktur pita energi</li> <li>Menjelaskan rapat pembawa muatan intrinsik</li> <li>Menjelaskan dan menentukan semikonduktor ekstrinsik</li> <li>Memprediksi Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul> |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | Product | 10      |
|            |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memprediksi rapat pembawa muatan ekstrinsik</li> <li>Menjelaskan Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur</li> </ul>  |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |         | Product |

| Minggu Ke- | Kemampuan Khusus                                  | Indikator   | Butir Soal Evaluasi |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    | Bentuk Test/Non Test | Bobot (%) |              |              |   |
|------------|---|---|---------------------|----|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----------------------|-----------|--------------|--------------|---|
|            |   |   | Kognitif            |    |    |    |    |    | Psikomotor |    |    |    |    | Afektif |    |    |    |                      |           |              |              |   |
|            |   |   | C1                  | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | P1         | P2 | P3 | P4 | P5 | A1      | A2 | A3 | A4 |                      |           | A5           |              |   |
|            |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami efek Hall</li> <li>Menjelaskan sambungan <math>p-n</math></li> <li>Menjabarkan efek termoelektrik</li> </ul>  |                     |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              |              |   |
| 12         | Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>Mengklasifikasikan tipe - tipe kemagnetan bahan</li> <li>Membedakan sifat Ferromagnetisme, Anti-ferromagnetisme, dan Ferrimagnetisme</li> </ul>   |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | Tes tertulis | 6            |   |
| 13         | Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami konsep polarisasi</li> <li>Memperkirakan konstanta dielektrik</li> <li>Menjelaskan pengaruh medan listrik lokal</li> <li>Memahami polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>Mengidentifikasi rugi-rugi dielektrik</li> <li>Menjelaskan fenomena optik</li> <li>Memahami aplikasi plasma</li> <li>Memahami mode fonon</li> </ul> |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              | Tes tertulis | 6 |

| Minggu Ke- | Kemampuan Khusus   | Indikator  | Butir Soal Evaluasi |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    | Bentuk Test/Non Test | Bobot (%) |              |              |   |
|------------|--|--|---------------------|----|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----------------------|-----------|--------------|--------------|---|
|            |  |  | Kognitif            |    |    |    |    |    | Psikomotor |    |    |    |    | Afektif |    |    |    |                      |           |              |              |   |
|            |  |  | C1                  | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | P1         | P2 | P3 | P4 | P5 | A1      | A2 | A3 | A4 |                      |           | A5           |              |   |
|            |  | pada kristal ionik   |                     |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              |              |   |
| 14         | Mahasiswa mampu mengklasifikasikan tentang konsep superkonduktivitas | <ul style="list-style-type: none"> <li>Menjelaskan sejarah perkembangan superkonduktivitas</li> <li>Memahami resistivitas listrik</li> <li>Memahami efek Meissner</li> <li>Memahami Arus-super dan kedalaman penetrasi</li> <li>Mengklasifikasikan Superkonduktor tipe I dan II</li> <li>Memahami Sifat termodinamik dan optik</li> <li>Menjelaskan efek isotop dan Josephson</li> <li>Memahami teori BCS</li> <li>Memberi contoh aplikasi superkonduktor</li> </ul> |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | Tes tertulis | 6            |   |
| 15         | Mahasiswa mampu memahami konsep Nano-Material                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Memahami pengertian nano-partikel dan nano-struktur</li> <li>Menjelaskan dan menggambarkan sifat silikon berporos</li> <li>Menjabarkan teknik fabrikasi</li> </ul>  |                     |    | 1  |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              | Tes tertulis | 6 |
| 16         | <b>UJIAN AKHIR SEMESTER</b>  |  |                     |    |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           |              |              |   |

| Minggu Ke- | Kemampuan Khusus | Indikator | Butir Soal Evaluasi |        |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    | Bentuk Test/Non Test | Bobot (%) |      |
|------------|------------------|-----------|---------------------|--------|----|----|----|----|------------|----|----|----|----|---------|----|----|----|----------------------|-----------|------|
|            |                  |           | Kognitif            |        |    |    |    |    | Psikomotor |    |    |    |    | Afektif |    |    |    |                      |           |      |
|            |                  |           | C1                  | C2     | C3 | C4 | C5 | C6 | P1         | P2 | P3 | P4 | P5 | A1      | A2 | A3 | A4 |                      |           | A5   |
| Jumlah     | Butir Soal       |           | 2                   | 14     |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | 16   |
|            | Prosentase       |           | 12,5 %              | 87,5 % |    |    |    |    |            |    |    |    |    |         |    |    |    |                      |           | 100% |

## 2.8 CONTOH TES URAIAN

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Perguruan Tinggi      | : Universitas Mulawarman   |
| Fakultas              | : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam                    |
| Program Studi         | : Fisika   |
| Mata Kuliah           | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah      | : 190704603W034  |
| Semester/sks          | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Mata Kuliah Prasyarat | : Fisika Kuantum, Fisika Modern, Listrik Magnet                    |
| Nama Dosen            | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si |

### 1. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat

#### Soal:

- 1) Dalam sistem kristal sederhana ortorombik, dua titik kisi terhubung satu sama lain dengan vektor translasi  $T = 2a + 3b + 4c$ , dimana  $a = 2\text{\AA}$ ,  $b = 3\text{\AA}$  dan  $c = 4\text{\AA}$ . Tentukan nilai dan arah vektor translasi!
- 2) Elemen kristal dengan struktur FCC dengan parameter sel satuan sebesar  $2\text{\AA}$ . Hitung kerapatannya jika 0.2 kg unsur tersebut mengandung  $24 \times 10^{24}$  atom.
- 3) Tentukan indeks Miller pada bidang yang melalui perpotongan pada  $3a, 4b, 6c$  sepanjang sumbu kristalik, dimana  $a, b, c$  merupakan vektor translasi primitif dari kisi.
- 4) Gambarkan bidang  $(\bar{1}11), (1\bar{1}2), (\bar{2}10)$
- 5) Jarak antara bidang  $(111)$  pada kristal FCC adalah  $2\text{\AA}$ . Tentukan parameter kisi dan diameter atomik.

### 2. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang konsep Ikatan kristal

#### Soal:

- 1) Energi potensial molekul diatomik dalam bentuk jarak interatomik  $R$  diberikan oleh:

$$U(R) = -\frac{A}{R^m} + \frac{B}{R^n}$$

Dimana  $A, B, m, n$  menyatakan konstanta karakteristik dari molekul  $MX$

- a. Turunkan pernyataan yang menyatakan jarak antar dalam keadaan setimbang

- b. Jelaskan pentingnya jarak setimbang sebagai konfigurasi dengan energi potensial terendah, selanjutnya dapatkan pernyataan untuk energi disosiasi atom
- c. Buktikan bahwa untuk  $n > m$  untuk  $U(R)$  menjadi minimum pada  $R = R_e$
- 2) Tentukan energi potensial molekul CsCl pada kondisi setimbang, jika jarak pisah antara atom Cesium dan Chlorine adalah  $3.56 \text{ \AA}$ ,  $A = 1.76$  dan  $n = 11.5$ .
- 3) Tentukan jarak tetangga terdekat pada struktur BCC dan FCC, ketika radius atom diberikan  $10 \text{ \AA}$

### 3. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu menginterpretasikan tentang konsep kisi resiprok dan penentuan striuktur kristal

#### Soal:

- 1) Tunjukkan bahwa volume sel satuan primitif dari struktur BCC diberikan oleh  $a^3/2$ , jika diketahui vektor translasi primitif dari kisi BCC diberikan oleh:

$$a' = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k})$$

$$b' = \frac{a}{2}(-\hat{i} + \hat{j} + \hat{k})$$

$$c' = \frac{a}{2}(\hat{i} - \hat{j} + \hat{k})$$

Dengan  $a$  menyatakan panjang sisi kubus,  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  menyatakan vektor satuan orthogonal sepanjang sisi-sisi kubus. Selanjutnya tentukan pula vektor kisi resiproknya.

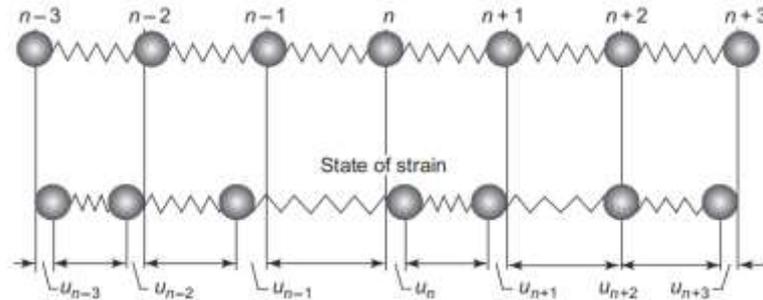
- 2) Suatu berkas sinar-x dengan panjang gelombang  $0.71 \text{ \AA}$  didifraksikan oleh kristal kubik KCl dengan kerapatan  $1.99 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ . Hitung jarak interplanar untuk bidang (200) dan sudut *glancing* untuk pantulan orde kedua dari bidang ini. Jika berat molekuler dari KCl adalah  $74.6 \text{ amu}$  dan bilangan Avogadro  $6.023 \times 10^{26} \text{ kg}^{-1} \text{ mole}^{-1}$ .
- 3) Sebuah kamera dengan radius  $57.3 \text{ mm}$  digunakan untuk mengamati pola difraksi serbuk emas (FCC) dengan parameter kisi  $4.08 \text{ \AA}$ . Sebuah cahaya monokromatik dengan radiasi  $\text{Mo} - \text{K}\alpha$  memiliki panjang gelombang  $0.71 \text{ \AA}$ . Tentukan empat nilai S yang pertama.

### 4. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang konsep vibrasi kristal

#### Soal:

- 1) Perhatikan Gambar yang menunjukkan Rantai linier atom identik dengan konstanta kisi =  $a$ . Dalam posisi kesetimbangan, kisi memiliki simetri

translasi. Pada posisi regangan, atom ke- $i$  dipindahkan sejauh  $U_i$  dari posisi setimbangnya



Tentukan hubungan disperse yang menyatakan hubungan antara frekuensi angular dan vektor gelombang ( $\omega$ - $k$ ) untuk kisi periodik 1D, seperti ditunjukkan pada Gambar di atas.

- 2) Jika kecepatan bunyi dalam padatan diambil sekitar  $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  dan jarak interatomik  $3 \times 10^{-10} \text{ m}$ , hitung nilai frekuensi cutoff pada kisi linera.
- 3) Jika kecepatan bunyi dalam padatan berada pada orde  $10^3 \text{ ms}^{-1}$ , dibandingkan frekuensi gelombang bunyi  $\lambda = 10 \text{ \AA}$  untuk (a) sistem monoatomik, (b) Gelombang akustik dan optik dalam sistem diatomik yang mengandung dua atom identik ( $m = M$ ) per sel satuan dengan jarak interatomik  $2.5 \text{ \AA}$ .

#### 5. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan

##### Soal:

- 1) Cahaya tampak dengan panjang gelombang  $5000 \text{ \AA}$  mengalami penghamburan oleh kristal dengan indeks bias  $n = 1.5$ . Hitung frekuensi maksimum dari fonon yang dibangkitkan dan perubahan fraksional frekuensi dari radiasi yang datang, jika diberikan kecepatan rambat bunyi dalam kristal adalah  $5000 \text{ ms}^{-1}$ .
- 2) Emas memiliki struktur yang sama dengan struktur tembaga. Jika diketahui kecepatan rambat bunyi di dalam emas adalah  $2100 \text{ ms}^{-1}$  dan dalam tembaga  $3800 \text{ ms}^{-1}$ . Jika temperatur Debye tembaga adalah  $348 \text{ K}$ , maka tentukan temperatur Debye dalam emas. Kerapatan emas dan tembaga masing-masing adalah  $1.93 \times 10^4 \text{ kgm}^{-3}$  dan  $8960 \text{ kgm}^{-3}$  dengan berat atom keduanya masing-masing  $197.0$  dan  $63.54 \text{ amu}$ .
- 3) Diketahui bahwa jari-jari ion-ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  adalah  $0.98$  dan  $1.81 \text{ \AA}$ . Modulus Young untuk  $\text{NaCl}$  dalam arah  $[100]$  adalah  $5 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$ . Dengan asumsi bahwa perluasan arah  $[100]$  yang dihasilkan kontraksi diabaikan dalam arah tegak lurus, maka hitung panjang gelombang yang mana radiasi elektromagnetik sangat kuat dipantulkan oleh kristal  $\text{NaCl}$ . Massa atom  $\text{Na}$  dan  $\text{Cl}$  masing-masing  $23$  dan  $35.5$ .

**6. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang teori elektron bebas pada logam**

**Soal:**

- 1) Jari-jari atomik sodium adalah  $1.86 \text{ \AA}$ . Hitung energi Fermi sodium pada saat temperatur nol mutlak.
- 2) Turunkan hubungan tekanan terhadap volume untuk gas elektron bebas pada 0 K. Selanjutnya dapatkan hubungan untuk modulus bulk dalam bentuk energi kinetik rata-rata.
- 3) Logam Na dengan struktur BCC memiliki dua atom per sel satuan. Jika jari-jari atom NA adalah  $1.85 \text{ \AA}$ . Hitung resistivitas listriknya pada saat  $0^\circ\text{C}$  jika nilai klasik dari waktu bebas rata-rata pada temperatur ini adalah  $3 \times 10^{-14}$  detik.

**7. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami konsep pita energi elektron**

**Soal:**

- 1) Buktikan bahwa potensial Kronig-Penney  $P \ll 1$ , dimana pita energi terendah pada  $k = 0$  dinyatakan dalam bentuk:

$$E = \frac{h^2 P}{4\pi^2 m a^2}$$

- 2) Jelaskan secara singkat tentang model elektron hampir bebas (nearly free electron model) dalam menjelaskan keberadaan celah energi terlarang (energy gap) dalam zat padat yang membedakan sifat-sifat penghantarannya!
- 3) Jelaskan beberapa kelemahan penggunaan model elektron bebas (*free electron model*) dalam menjelaskan sifat-sifat zat padat secara keseluruhan!
- 4) Model elektron bebas untuk logam, mengasumsikan bahwa elektron konduksi dapat diaproksimasi dengan gas elektron bebas, dimana parameter untuk gas yang penting yaitu  $n$  jumlah kerapatan elektron dan  $\tau$  waktu antar tumbukan elektron. Tunjukkan bahwa konduktivitas listrik dari model ini untuk logam dinyatakan dengan persamaan :

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

Jika diketahui resistivitas logam Cu  $1.7 \times 10^{-6} \text{ Ohm cm}$  dan kerapatan atom Cu  $8.5 \times 10^{28} \text{ atom/cm}^3$ , perkirakan waktu tumbukan  $\tau$  dari elektron Cu.

**8. KK/Sub CP-MK: Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi**

**Soal:**

- 1) Energi yang berdekatan dengan ujung pita valensi pada suatu kristal dinyatakan sebagai:

$$E = -AK^2$$

Dimana  $A = 10^{-39} \text{ Jm}^2$ . Sebuah elektron dengan vektor gelombang  $k = 10^{10} k_x m^{-1}$  telah terhapus dari orbital pada pita valensi yang terisi penuh. Tentukan massa efektif, kecepatan, momentum dan energi hole.

- 2) Dalam pita energi elektron bergerak dalam bentuk paket gelombang, akibat pengaruh medan listrik  $\vec{\xi}$ . Buktikan bahwa persamaan gerak elektron tersebut dinyatakan dalam bentuk :

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{F}$$

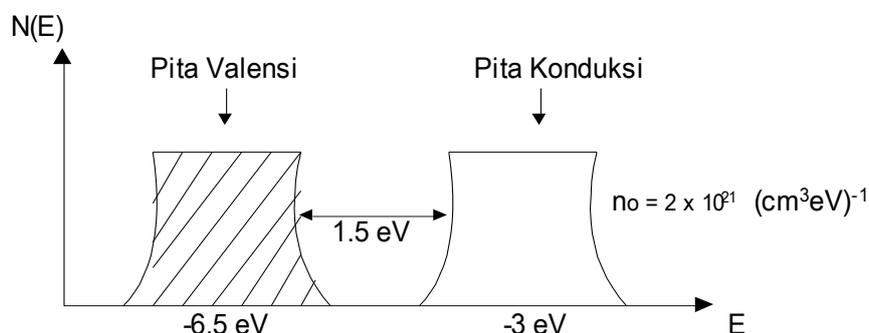
- 3) Buktikan bahwa jumlah orbital per satuan energi pada tingkat energi Fermi adalah merupakan jumlah total elektron konduksi dibagi dengan energi Fermi, secara matematis dinyatakan sebagai :

$$D(\epsilon) \equiv \frac{dN}{d\epsilon} = \frac{3N}{2\epsilon}$$

**9. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor**

**Soal:**

- 1) Tinjau suatu semikonduktor intrinsik dengan fungsi rapat keadaan  $N(E)$  seperti yang ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :
- Dimana tingkat energi Fermi terhadap pita valensi dan pita konduksi ?.
  - Hitung kerapatan elektron dalam pita konduksi pada temperatur kamar ?.



- 2) Sebuah SK Intrinsik (kristal Si) didoping dengan  $10^{16} \text{ atom/cm}^3$  Arsenik (As). Tentukan konsentrasi pembawa dan tingkat energi Fermi pada temperatur kamar dan gambarkan diagram energinya!

3) Kristal Silikon dengan energi gap  $\varepsilon_g = 1.14 \text{ eV}$ , massa efektif hole diambil  $m_h = 0.3m$  dan massa efektif elektron  $m_e = 0.2m$

a. Turunkan pernyataan untuk fungsi  $f(T)$  dalam hukum aksi massa :

$$np = f(T)$$

dimana n dan p konsentrasi elektron dan hole, serta T suhu. (Gunakan

$$\int_0^{\infty} x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx = \left( \frac{\pi}{4} \right)^{\frac{1}{2}} )$$

b. Konsentrasi  $N_D$  dari donor pentavalent As harus ditambahkan untuk menghasilkan konduktivitas ekstrinsik  $10^4$  kali lebih besar dari konduktivitas intrinsiknya pada temperatur kamar ?. (abaikan pengotor akseptor).

4) Dalam semikonduktor tipe-n, hubungan  $E$  terhadap  $k$  untuk elektron dalam pita konduksi dinyatakan sebagai :

$$E = ak^2 + C \quad ; C \text{ konstanta}$$

resonansi siklotron untuk elektron dalam medan magnet  $B = 0.1 \text{ Wb} / \text{m}^2$  terjadi frekuensi angular  $\omega_c = 1.8 \times 10^{11} \text{ rads}^{-1}$ .

a. Tentukan nilai  $a$

b. Dengan mengasumsikan bahwa semikonduktor didoping dengan donor pentavalent. Perkirakan jumlah donor per  $\text{m}^3$  diberikan koefisien Hall pada suhu kamar  $R_H = 6.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{C}^{-1}$

5) Sebuah semikonduktor didoping dengan ketidamurnian Fosfor sebanyak  $10^{16} \text{ atom/cm}^3$  sehingga dihasilkan semikonduktor tipe-n. Turunkan pernyataan untuk menyatakan resistivitas semikonduktor tipe-n tersebut dan berapa besar resistivitas bahan tersebut pada suhu kamar !

6) Turunkan pernyataan untuk koefisien Hall bagi semikonduktor intrinsik dalam bentuk mobilitas elektron dan hole, serta kerapatan pembawa muatan ?

7) Germanium (Ge) merupakan semikonduktor intrinsik dengan rapat muatan  $2.4 \times 10^{19}$  muatan per  $\text{m}^3$  pada temperatur 300 K. Bahan tersebut akan dibuat jenis semikonduktor ekstrinsik dengan menambahkan ketidamurnian p Indium pada laju atom Indium sekitar  $4 \times 10^8$  per atom Germanium. Jika terdapat sekitar  $4.4 \times 10^{28}$  atom Germanium per  $\text{m}^3$ , maka tentukan konsentrasi pembawa muatan minoritasnya dan bahas hasilnya!

## 10. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan

### Soal:

- 1) Jelaskan klasifikasi bahan magnetik berdasarkan harga suseptibilitas magnetik ( $\chi = M/B$ ) dan sebutkan beberapa contohnya !
- 2) Jika kristal besi termagnetisasi total secara spontan, perkirakan hasil magnetisasi tersebut dengan menggunakan nilai-nilai yang sesuai :  $\rho_{besi} = 7.9$  (berat spesifik), berat atom besi (A) = 56 dan bilangan Avogadro ( $N_A$ ) =  $6.02 \times 10^{23}$  !.
- 3) Sebuah elektron bersirkulasi dalam medan magnetik dengan  $B = 2.0T$  yang bekerja secara tegak lurus pada bidang lintasan. Hitunglah perubahan momen magnetiknya !.
- 4) Tinjau gas elektron konduksi pada suhu nol mutlak dalam medan magnetik lemah  $B$ . Jika konsentrasi spin up  $N_+$  dan spin down  $N_-$  elektron dapat diparameterisasi oleh kuantitas  $x$ , maka :

$$N_+ = \frac{1}{2} N(1+x), \quad N_- = \frac{1}{2} N(1-x)$$

dimana  $N$  jumlah total elektron. Buktikanlah bahwa suseptibilitas magnetik  $\chi = M/B$  dapat dinyatakan sebagai :

$$\chi = \frac{3n\mu_B^2}{2E_F}$$

- 5) Apa yang dimaksud dengan harga jenuh spesifik untuk kerapatan magnetisasi dari besi/baja (satuan keadaan)?. Dari harga ini dan harga spesifik lainnya, perkirakan momen magnetik spin intrinsik elektron untuk keadaan feromagnetisme !.

## 11. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik

### Soal:

- 1) Buktikan bahwa konstanta dielektrik sebagai fungsi  $\omega$  untuk elektron bebas gas dengan kerapatan  $n$  dinyatakan sebagai :

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

dengan :  $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m}$

Jika volume sel satuan primitif logam Na  $35 \times 10^{-30} m^3$ , hitunglah panjang gelombang pancung (cuttof) logam Na tersebut!.

- 2) Tentukan persentasi polarisabilitas ionik dari kristal NaCl dengan indeks bias optik dan konstanta dielektrik masing-masing 1.5 dan 5.6!.
- 3) Asumsikan bahwa terdapat sekitar  $10^{27}$  molekul HCl/ $m^3$ , maka tentukan orientasi polarisasi pada temperatur ruang jika HCl ini berada di bawah

pengaruh medan listrik sebesar  $10^6$  V/m. Momen dipol molekul HCl sekitar  $3.46 \times 10^{-30}$  C-m. Tunjukkan bahwa pada temperatur dan medan tinggi ini, nilai  $a$  ( $=pE/kT$ ) sangat kecil.

- 4) Jelaskan fenomena polarisasi alamiah dari bahan ferroelektrik!
- 5) Buktikan bahwa konstanta dielektrik sebagai fungsi  $\omega$  untuk elektron bebas gas dengan kerapatan  $n$  dinyatakan sebagai :

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

dengan :  $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$

Jika volume sel satuan primitif logam Na  $35 \times 10^{-30} \text{ m}^3$ , hitunglah panjang gelombang pancung (cuttof) logam Na tersebut !.

## 12. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu mengklasifikasikan tentang konsep superkonduktivitas

### Soal:

- 1) Jelaskan perbedaan antara Superkonduktor tipe I dan superkonduktor tipe II.
- 2) Hitung kerapatan elektron superkonduktif Merkuri pada 3.5 K, jika diberikan temperatur transisi Merkuri 4.22 K.
- 3) Kedalaman penetrasi London untuk suatu sampel pada 6 K dan 7 K adalah 41.2 nm dan 183.0 nm. Hitung temperatur transisi selama kedalaman penetrasi pada 0 K.
- 4) Diketahui temperatur kritis  $T_C$  untuk Hg dengan massa isotop 199.5 adalah 4.185 K. Hitung temperatur kritisnya pada saat massa isotop berubah menjadi 203.4.
- 5) Hitung rapat arus kritis untuk kawat dengan diameter 1 mm pada 4.2 K. Asumsikan bahwa intensitas medan magnetik kritis bergantung pada temperatur ( $T$ ). Diberikan  $T_C$  untuk timah 7.18 K dan  $H_C(0)$  adalah  $6.5 \times 10^4$  A/m.

## 13. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami konsep Nano-Material

### Soal:

- 1) Gambarkan secara singkat dan jelas tentang struktur dan sifat-sifat partikel-nano.
- 2) Jelaskan struktur dan sifat karbon nano-tube (CNT)
- 3) Jelaskan bagaimana Kuantum Dot (Quantum Dot) dihasilkan berdasarkan struktur, sifat-sifat karakteristik, dan aplikasinya.
- 4) Jelaskan prinsip kerja Atomic Force Microscopy (AFM)

## 2.9 JAWABAN

### 1. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat

#### Soal:

- 1) Dalam sistem kristal sederhana ortorombik, dua titik kisi terhubung satu sama lain dengan vektor translasi  $T = 2a + 3b + 4c$ , dimana  $a = 2\text{\AA}$ ,  $b = 3\text{\AA}$  dan  $c = 4\text{\AA}$ . Tentukan nilai dan arah vektor translasi!

#### Pembahasan:

Diberikan  $a = 2\text{\AA}$ ,  $b = 3\text{\AA}$ ,  $c = 4\text{\AA}$ ,  $n_1 = 2$ ,  $n_2 = 3$ , dan  $n_3 = 4$ , kita ketahui bahwa untuk kasus ortorombik  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  dan  $\cos 90^\circ = 0$ , sehingga panjang resultan vektor antara kedua titik kisi tersebut bisa dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(n_1 a)^2 + (n_2 b)^2 + (n_3 c)^2} \\ &= \sqrt{(2 \times 2)^2 + (3 \times 3)^2 + (4 \times 4)^2} \\ &= \sqrt{16 + 81 + 256} = 18.79 \text{\AA} \end{aligned}$$

Arah vektor translasi adalah [234]

- 2) Elemen kristal dengan struktur FCC dengan parameter sel satuan sebesar  $2\text{\AA}$ . Hitung kerapatannya jika  $0.2$  kg unsur tersebut mengandung  $24 \times 10^{24}$  atom.

#### Pembahasan:

Diberikan untuk struktur FCC dengan  $n = 4$ ,  $a = 2\text{\AA} = 2 \times 10^{-10}$  m,  $m = 0.2$  kg, jumlah atom dalam  $0.2$  kg =  $24 \times 10^{24}$  atom, maka nilai  $\rho = ?$

Kita ketahui bahwa jumlah total atom adalah:

Jumlah total atom = (Atom/sel satuan) x jumlah sel satuan

$$\text{Jumlah sel satuan} = \frac{\text{Jumlah total atom}}{\frac{\text{atom}}{\text{sel}} \text{ satuan}} = \frac{24 \times 10^{24}}{4}$$

$$\text{Jumlah sel satuan} = 6 \times 10^{23}$$

Selanjutnya, volume substansi menjadi:

$Vol = \text{Jumlah sel satuan} \times Vol. \text{ sel satuan}$

$$Vol = 6 \times 10^{23} (2 \times 10^{-10})^3 = 48 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Sehingga kerapatan kristal menjadi:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0.2}{48 \times 10^{-7}} = 4.17 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$$

- 3) Tentukan indeks Miller pada bidang yang melalui perpotongan pada  $3a, 4b, 6c$  sepanjang sumbu kristalik, dimana  $a, b, c$  merupakan vektor translasi primitif dari kisi.

#### Pembahasan:

Tinjau prosedur di bawah ini:

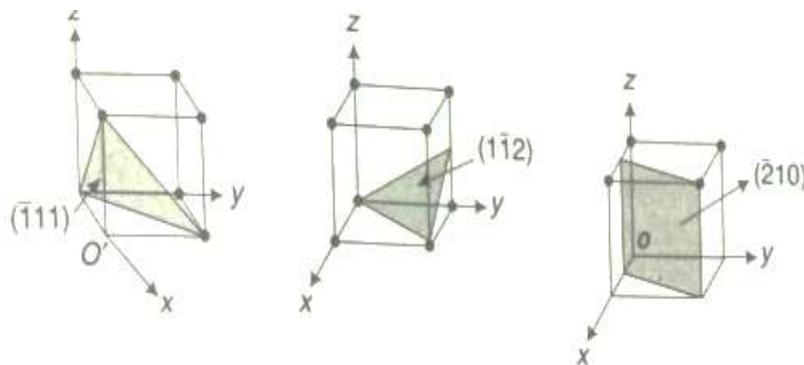
|       |                                 |                    |                    |                    |
|-------|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| (i)   | Perpotongan                     | 3a                 | 4b                 | 6c                 |
| (ii)  | Pembagian oleh satuan translasi | $\frac{3a}{a} = 3$ | $\frac{4b}{b} = 4$ | $\frac{6c}{c} = 6$ |
| (iii) | Resiprok                        | $\frac{1}{3}$      | $\frac{1}{4}$      | $\frac{1}{6}$      |
| (iv)  | Setelah pembagian               | 4                  | 3                  | 2                  |

Indeks Miller bidang (432)

4) Gambarkan bidang  $(\bar{1}11)$ ,  $(1\bar{1}2)$ ,  $(\bar{2}10)$

**Pembahasan:**

Buat struktur sel satuan kubik, selanjutnya pilih titik asal dan tiga sumbu kristalografik. Gambarannya ditunjukkan sebagai berikut:



5) Jarak antara bidang (111) pada kristal FCC adalah  $2\text{\AA}$ . Tentukan parameter kisi dan diameter atomik.

**Pembahasan:**

Diberikan bidang Miller (111), maka kristal FCC ini:

$$d_{111} = 2\text{\AA}$$

Jarak interplanar antara bidang (111) pada kristal FCC:

$$d_{111} = \frac{a}{\sqrt{3}} = 2\text{\AA} \rightarrow a = 2\sqrt{3}\text{\AA}$$

Dalam kristal FCC hubungan antara parameter kisi dan diameter atom diberikan oleh:

$$\sqrt{2}a = 4R = 2D \rightarrow D = \frac{\sqrt{2}a}{2} = \sqrt{6} a$$

**2. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang konsep Ikatan kristal**

**Soal:**

1) Energi potensial molekul diatomik dalam bentuk jarak interatomik  $R$  diberikan oleh:

$$U(R) = -\frac{A}{R^m} + \frac{B}{R^n}$$

Dimana  $A, B, m, n$  menyatakan konstanta karakteristik dari molekul  $MX$

- Turunkan pernyataan yang menyatakan jarak antar dalam keadaan setimbang
- Jelaskan pentingnya jarak setimbang sebagai konfigurasi dengan energi potensial terendah, selanjutnya dapatkan pernyataan untuk energi disosiasi atom
- Buktikan bahwa untuk  $n > m$  untuk  $U(R)$  menjadi minimum pada  $R = R_e$

**Pembahasan:**

- Karena jarak setimbang  $R_e$  (panjang ikatan), gaya tarik = gaya tolak, dimana gaya interaksi antara dua atom sebagai fungsi dari  $R$ , sehingga:

$$F = -\frac{dU}{dR} = -\frac{mA}{R^{m+1}} + \frac{nB}{R^{n+1}}$$

Selanjutnya, pada saat jarak setimbang ( $R = R_e$ )

$$F = -\left(\frac{dU}{dR}\right)_{R=R_e} = 0$$

$$\frac{mA}{R_e^{m+1}} = \frac{nB}{R_e^{n+1}}$$

Selanjutnya:

$$R_e = \left(\frac{nB}{mA}\right)^{1/n-m}$$

Yang merupakan jarak seimbang yang diperlukan.

- Substitusi nilai  $R_e$ , sehingga energi potensial diperoleh:

$$U_e = U_{R=R_e} = -\frac{A}{R_e^m} \left(1 - \frac{m}{n}\right)$$

Ketika gaya total nol, maka energi potensial minimum dan negatif, sementara kuantitas positif  $D = -U_e$  disebut energi disosiasi molekul, yaitu energi untuk memisahkan dua atom

- Sebagai catatan bahwa gaya tarik dan tolak adalah setimbang pada jarak setimbang, sementara energi tarik dan tolak tidak sama karena  $m \neq n$ . Hal ini cukup jelas pada soal (b), nilai minimum pada kurva energi kemungkinan bisa dicapai pada saat  $n > m$ . Sebagai konsekuensinya, formasi ikatan kimia diperlukan ketika gaya tolak berada dalam jangkauan pendek dibandingkan gaya tarik. Hal ini dapat dari syarat:

$$\left(\frac{d^2U}{dR^2}\right)_{R=R_e} > 0$$

Jika  $U$  harus minimum pada  $R_e$ , hal ini berkaitan dengan:

$$-\frac{m(m+1)A}{R_e^{m+2}} + \frac{n(n+1)A}{R_e^{n+2}} > 0$$

$$n(n+1)BR_e^{m+2} - m(m+1)AR_e^{n+2} > 0$$

$$n(n+1)BR_e^{m+2} > m(m+1)AR_e^{n+2}$$

$$n(n+1)B > m(m+1)AR_e^{n-m}$$

$$n(n+1)B > m(m+1)A \frac{nB}{mA}$$

$$n+1 > m+1 \rightarrow n > m$$

- 2) Tentukan energi potensial molekul CsCl pada kondisi setimbang, jika jarak pisah antara atom Cesium dan Chlorine adalah  $3.56 \text{ \AA}$ ,  $A = 1.76$  dan  $n = 11.5$ .

**Pembahasan:**

Diberikan  $R_e = 3.56 \text{ \AA} = 3.56 \times 10^{-10} \text{ m}$ ,  $n = 11.5$ ,  $A = 1.76$ , maka  $U_e$  menjadi:

$$U_e = -\frac{Ae}{4\pi\epsilon_0 R_e} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \text{ (eV)}$$

$$U_e = -\frac{Ae^2}{4\pi\epsilon_0 R_e} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \text{ (Joule)}$$

$$U_e = -\frac{1.76 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 9 \times 10^9}{3.56 \times 10^{-10}} \times \frac{10.5}{11.5} = -6.50 \text{ (eV)}$$

- 3) Tentukan jarak tetangga terdekat pada struktur BCC dan FCC, ketika radius atom diberikan  $10 \text{ \AA}$ .

**Pembahasan:**

Diberikan radius atom  $10 \text{ \AA}$ , misalkan radius untuk keduanya dinyatakan sebagai  $d_{fcc}$  dan. Diketahui bahwa jarak tetangga terdekat dalam struktur BCC adalah setengahnya dari diagonal ruang  $d_{bcc} = \frac{\sqrt{3}}{2} a$ , dimana  $a$  menyatakan panjang sisi kubus. Syarat batas untuk struktur BCC:

$$\sqrt{3}a = 4R \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} a = 2R = 2 \times 10 \text{ \AA} = 20 \text{ \AA}$$

Sama halnya dengan jarak tetangga terdekat untuk struktur FCC setengah dari diagonal muka:

$$d_{fcc} = \frac{\sqrt{2}}{2} a = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

Syarat batas untuk struktur FCC:

$$\sqrt{2}a = 4R \rightarrow \frac{\sqrt{2}}{2} a = 2R = 2 \times 10 \text{ \AA} = 20 \text{ \AA}$$

**3. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu menginterpretasikan tentang konsep kisi resiprok dan penentuan striuktur kristal**

**Soal:**

- 1) Tunjukkan bahwa volume sel satuan primitif dari struktur BCC diberikan oleh  $a^3/2$ , jika diketahui vektor translasi primitif dari kisi BCC diberikan oleh:

$$a' = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k})$$

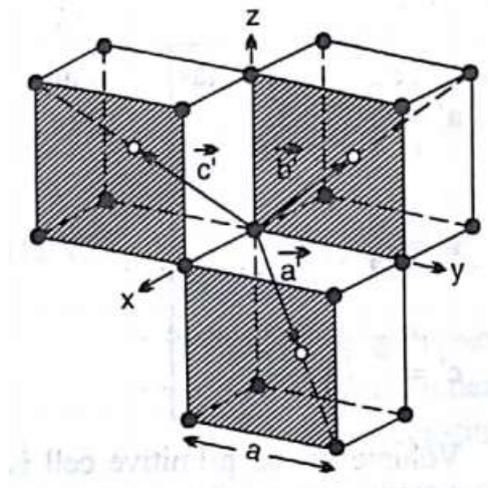
$$b' = \frac{a}{2}(-\hat{i} + \hat{j} + \hat{k})$$

$$c' = \frac{a}{2}(\hat{i} - \hat{j} + \hat{k})$$

Dengan  $a$  menyatakan panjang sisi kubus,  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  menyatakan vektor satuan orthogonal sepanjang sisi-sisi kubus. Selanjutnya tentukan pula vektor kisi resiproknya.

**Pembahasan:**

Tinjau gambar di bawah ini:



Vektor translasi primitif struktur BCC

$$a' = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k})$$

$$b' = \frac{a}{2}(-\hat{i} + \hat{j} + \hat{k})$$

$$c' = \frac{a}{2}(\hat{i} - \hat{j} + \hat{k})$$

Volume sel primitif dinyatakan dengan persamaan:

$$V = a' \cdot b' \times c' = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k}) \cdot \left[ \frac{a^2}{4}(-\hat{i} + \hat{j} + \hat{k}) \times (\hat{i} - \hat{j} + \hat{k}) \right]$$

$$V = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k}) \cdot \frac{a^2}{2}(\hat{i} + \hat{j}) = \frac{a^3}{2}$$

Vektor kisi resiprok dinyatakan sebagai:

$$a^* = 2\pi \frac{b' \times c'}{a' \cdot b' \times c'} = \frac{2\pi(a^2/2)}{a^3/2}(\hat{i} + \hat{j}) = \frac{2\pi}{a}(\hat{i} + \hat{j})$$

$$b^* = 2\pi \frac{c' \times a'}{a' \cdot b' \times c'} = \frac{2\pi}{a} (\hat{j} + \hat{k})$$

$$c^* = 2\pi \frac{a' \times b'}{a' \cdot b' \times c'} = \frac{2\pi}{a} (\hat{k} + \hat{i})$$

- 2) Suatu berkas sinar-x dengan panjang gelombang  $0.71 \text{ \AA}$  didifraksikan oleh kristal kubik KCl dengan kerapatan  $1.99 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ . Hitung jarak interplanar untuk bidang (200) dan sudut *glancing* untuk pantulan orde kedua dari bidang ini. Jika berat molekuler dari KCl adalah 74.6 amu dan bilangan Avogadro  $6.023 \times 10^{26} \text{ kg}^{-1}\text{mole}^{-1}$ .

**Pembahasan:**

Untuk kristal kubik diketahui bahwa:

$$a^3 = \frac{n'M}{N\rho}$$

Dimana  $a$  menyatakan konstanta kisi,  $n'$  menyatakan jumlah molekul dalam sel satuan,  $M$  menyatakan berat molekuler,  $N$  menyatakan bilangan Avogadro dan  $\rho$  menyatakan kerapatan. Molekul KCl memiliki struktur mirip dengan NaCl, sehingga  $n' = 4$ :

$$a^3 = \frac{4 \times 74.6}{6.023 \times 10^{26} \times 1.99 \times 10^3} = 0.249 \times 10^{-27}$$

$$a = 6.29 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Jarak interplanar bidang (200):

$$d_{200} = \frac{a}{(4 + 0 + 0)^{1/2}} = \frac{6.29 \times 10^{-10}}{2} = 3.145 \text{ \AA}$$

Dengan menggunakan Hukum Bragg:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

Untuk refleksi orde kedua  $n = 2$

$$d \sin \theta = \lambda/d = 0.71/3.145 = 0.461$$

$$\theta = 27.5^\circ$$

- 3) Sebuah kamera dengan radius 57.3 mm digunakan untuk mengamati pola difraksi serbuk emas (FCC) dengan parameter kisi  $4.08 \text{ \AA}$ . Sebuah cahaya monokromatik dengan radiasi  $\text{Mo} - \text{K}_\alpha$  memiliki panjang gelombang  $0.71 \text{ \AA}$ . Tentukan empat nilai  $S$  yang pertama.

**Pembahasan:**

Diketahui:  $R = 57.3 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 0.71 \text{ \AA}$ , dan  $a = 4.08 \text{ \AA}$ , maka nilai  $(h^2 + k^2 + l^2)$  untuk empat refleksi pertama dari kristal FCC adalah 3, 4, 8 dan 11. Gunakan Hukum Bragg:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

Juga untuk kristal kubik:

$$d_{hkl} = \frac{a}{(h^2 + k^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}}$$

Sehingga diperoleh:

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2)$$

Untuk  $(h^2 + k^2 + l^2) = 3$ , maka:

$$\sin^2 \theta = \frac{3(0.71)^2}{4(4.08)^2} = 0.027$$

$$\theta_1 = 8.67^\circ$$

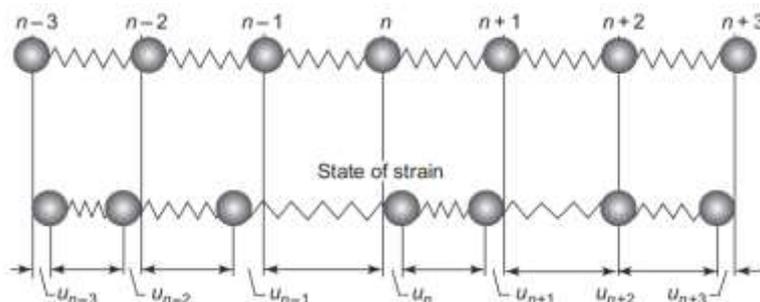
Sama halnya  $(h^2 + k^2 + l^2) = 4, 8, 11$  akan diperoleh  $\theta_2 = 10.02^\circ$ ,

$$\theta_3 = 14.25^\circ \text{ dan } \theta_4 = 16.78^\circ$$

#### 4) KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang konsep vibrasi kristal

**Soal:**

- 1) Perhatikan Gambar yang menunjukkan Rantai linier atom identik dengan konstanta kisi = a. Dalam posisi kesetimbangan, kisi memiliki simetri translasi. Pada posisi regangan, atom ke-i dipindahkan sejauh  $U_i$  dari posisi setimbangnya



Tentukan hubungan disperse yang menyatakan hubungan antara frekuensi angular dan vektor gelombang ( $\omega$ - $k$ ) untuk kisi periodik 1D, seperti ditunjukkan pada Gambar di atas.

**Pembahasan:**

Untuk menghitung gaya efektif pada sebuah atom, gaya pada atom n akan diberikan oleh perpindahannya dan perpindahan dari dua tetangga terdekatnya, yaitu dengan perubahan total panjang kiri dan pegas kanan terpasang padanya. Konstanta gaya akan dilambangkan dengan simbol  $\beta$ , sehingga:

$$F_n = \beta[(U_{n+1} - U_n) - (U_n - U_{n-1})] = \beta[U_{n+1} - 2U_n + U_{n-1}] \quad (1)$$

Dalam bentuk persamaan gerak:

$$F_n = M \frac{\delta^2 U_n}{\delta t^2} = \beta[(U_{n+1} - 2U_n + U_{n-1})] \quad (2)$$

di mana  $M$  adalah massa satu atom. Solusi Persamaan (2) dalam bentuk,

$$U_n = U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}na)) \quad (3)$$

di mana  $\mathbf{k}$  vektor gelombang =  $2\pi/\lambda$  dan  $na$  adalah posisi kesetimbangan atom ke- $n$ . Persamaan (3) merupakan gelombang berjalan di mana semua atom beresilasi dengan frekuensi yang sama ( $\omega$ ) dan amplitudo ( $U_0$ ) dan memiliki vektor gelombang,  $\mathbf{k}$ . Perlu juga dicatat bahwa solusi bentuk (3) dimungkinkan karena simetri translasi kisi, yaitu, adanya massa yang sama pada interval yang teratur. Jika massa memiliki nilai acak atau terdistribusi secara acak di sepanjang garis, maka solusinya diharapkan menjadi gelombang yang sangat dilemahkan. Dalam kasus ekstrim, solusi gelombang yang merambat bahkan tidak mungkin. Menurut Persamaan (3),

$$U_{n+1} = U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n+1)a)) \quad (4)$$

$$U_{n-1} = U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n-1)a)) \quad (5)$$

Mengganti Persamaan (3), (4), dan (5) dalam Persamaan (2), kita memperoleh ruas kiri dari Persamaan (2),

$$M \frac{\delta^2}{\delta t^2} [U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n+1)a))] = M(i)^2 \omega^2 U_n = -M\omega^2 U_n \quad (6)$$

Ruas sebelah kanan,

$$\begin{aligned} & \beta [U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n+1)a)) - 2U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}na))] + U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n-1)a)) \\ & = \\ & \beta U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}na)) [\exp(-i\mathbf{k}a) - 2 + \exp(i\mathbf{k}a)] = -2\beta U_n (1 - \cos \mathbf{k}a) \end{aligned} \quad (7)$$

Bandingkan ruas kiri (Pers. 6) dan ruas kanan (Pers. 7):

$$-M\omega^2 U_n = -2\beta U_n (1 - \cos \mathbf{k}a)$$

$$M\omega^2 U_n = 2\beta U_n (1 - \cos \mathbf{k}a) = 2\beta \left[ \cos^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} + \sin^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} - \cos^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} + \sin^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} \right]$$

$$\omega^2 = \frac{2\beta}{M} \left( \sin^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} \right) \rightarrow \omega = \pm 2 \sqrt{\frac{\beta}{M}} \left( \sin \frac{\mathbf{k}a}{2} \right) = 2\omega_M \sin \frac{\mathbf{k}a}{2} \quad (8)$$

dengan

$$\omega_M = \pm \sqrt{4 \frac{\beta}{M}} \quad (9)$$

Dalam Persamaan (8), tanda negatif telah diabaikan karena frekuensinya tidak boleh negatif. Pada batas panjang gelombang panjang,

$$\mathbf{k}a = \frac{2\pi}{\lambda} a \quad (10)$$

dan ketika  $\lambda$  sangat panjang,  $\mathbf{k}a$  menjadi sangat kecil, sehingga,

$$2 \sqrt{\frac{\beta}{M}} \left( \sin \frac{\mathbf{k}a}{2} \right) = 2 \sqrt{\frac{\beta}{M}} \left( \frac{\mathbf{k}a}{2} \right) = \sqrt{\frac{\beta}{M}} a \mathbf{k} \quad (11)$$

Sehingga persamaan (8) dapat ditulis menjadi:

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{\beta}{M}} a \mathbf{k} = \vartheta \mathbf{k} \\ \vartheta &= \sqrt{\frac{\beta}{M}} a \end{aligned} \quad (12)$$

Yang menyatakan hubungan dispersi antara frekuensi angular dan vektor gelombang ( $\omega$ - $\mathbf{k}$ ) untuk kisi periodik 1D.

- 2) Jika kecepatan bunyi dalam padatan diambil sekitar  $3 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$  dan jarak interatomik  $3 \times 10^{-10} \text{ m}$ , hitung nilai frekuensi cutoff pada kisi linera.

**Pembahasan:**

Diberikan  $v = 3 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$ ,  $a = 3 \times 10^{-10} \text{ m}$ , maka frekuensi kritis (cutoff) akan terjadi pada saat  $k = \pi/a$  (pada saat  $\lambda \cong 2a$ ), maka:

$$v = \lambda v = 2va \rightarrow v = \frac{v}{2a} = \frac{3 \times 10^3}{2 \times 3 \times 10^{-10}} = 5 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

- 3) Jika kecepatan bunyi dalam padatan berada pada orde  $10^3 \text{ ms}^{-1}$ , dibandingkan frekuensi gelombang bunyi  $\lambda = 10 \text{ \AA}$  untuk (a) sistem monoatomik, (b) Gelombang akustik dan optik dalam sistem diatomik yang mengandung dua atom identik ( $m = M$ ) per sel satuan dengan jarak interatomik  $2.5 \text{ \AA}$ .

**Pembahasan:**

Diberikan kecepatan bunyi  $v_0 = 10^3 \text{ ms}^{-1}$

- a. Untuk kasus kisi monoatomik, frekuensi dinyatakan sebagai:

$$\omega = v_0 k = v_0 \frac{2\pi}{\lambda} = 10^3 \times \frac{2\pi}{10 \times 10^{-10}} = 6.28 \times 10^{12} \text{ rad/s}$$

- b. Untuk gelombang akustik dalam kisi diatomik (identik ( $m = M$ )) frekuensi bervariasi antara

$$\omega = 0, \text{ pada } k = 0 \text{ sampai } \omega = \left( \frac{2K}{m} \right)^{1/2}, \text{ pada } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Pernyataan untuk kecepatan diberikan oleh:

$$v_0 = a \left( \frac{2K}{m} \right)^{1/2}$$

atau:

$$\omega = \frac{v_0}{a} = \left( \frac{2K}{m} \right)^{1/2} = \frac{10^3}{2.5 \times 10^{-10}} = 4 \times 10^{12} \text{ rad/s}$$

Untuk gelombang optik:

$$\omega = \left( \frac{4K}{m} \right)^{1/2} \text{ pada } k = 0, \text{ sampai } \omega = \left( \frac{2K}{m} \right)^{1/2} \text{ pada } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Sehingga:

$$\omega = \sqrt{2} \left( \frac{v_0}{a} \right) = 4\sqrt{2} \times 10^{12} \text{ rad/s } (k = 0)$$

$$\omega = \left( \frac{v_0}{a} \right) = 4 \times 10^{12} \text{ rad/s } \left( k = \frac{2\pi}{\lambda} \right)$$

## 5. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan

**Soal:**

- 1) Cahaya tampak dengan panjang gelombang 5000 Å mengalami penghamburan oleh kristal dengan indeks bias  $n = 1.5$ . Hitung frekuensi maksimum dari fonon yang dibangkitkan dan perubahan fraksional frekuensi dari radiasi yang datang, jika diberikan kecepatan rambat bunyi dalam kristal adalah 5000 ms<sup>-1</sup>.

**Pembahasan:**

Frekuensi fonon yang diemisikan dinyatakan dalam persamaan:

$$\omega = \frac{2v_s \omega_{fonon} n}{c} \sin \frac{\phi}{2}$$

Frekuensi radiasi datang  $\omega_{fonon}$  dihitung menggunakan:

$$\omega_{fonon} = 2\pi\nu = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2\pi \frac{3 \times 10^8}{5000 \times 10^{-10}} = 3.77 \times 10^{15} \text{ rad/s}$$

Pada saat  $\omega$  maksimum, maka:

$$\sin \frac{\phi}{2} = 1$$

Dengan  $\phi$  menyatakan sudut hamburan

$$\omega = \frac{2v_s \omega_{fonon} n}{c} = \frac{2 \times 5000 \times 3.77 \times 10^{15} \times 1.5}{3 \times 10^8}$$

$$\omega = 1.86 \times 10^{11} \text{ rad/s}$$

Jika  $\omega'_{foton}$  menyatakan frekuensi foton terhambur, maka:

$$\omega_{fonon} - \omega'_{foton} = \omega$$

Sehingga, perubahan fraksional frekuensi foton yang datang adalah:

$$\frac{\omega_{fonon} - \omega'_{foton}}{\omega_{fonon}} = \frac{\omega}{\omega_{fonon}} = \frac{1.86 \times 10^{11}}{3.77 \times 10^{15}} = 5 \times 10^{-5}$$

- 2) Emas memiliki struktur yang sama dengan struktur tembaga. Jika diketahui kecepatan rambat bunyi di dalam emas adalah 2100 ms<sup>-1</sup> dan dalam tembaga 3800 ms<sup>-1</sup>. Jika temperatur Debye tembaga adalah 348 K, maka tentukan temperatur Debye dalam emas. Kerapatan emas dan tembaga masing-masing adalah 1.93 x 10<sup>4</sup> kgm<sup>-3</sup> dan 8960 kgm<sup>-3</sup> dengan berat atom keduanya masing-masing 197.0 dan 63.54 amu.

**Pembahasan:**

Temperatur Debye,  $\theta_D$  dinyatakan sebagai:

$$\theta_D = \frac{h\nu_D}{k_B}$$

Dimana  $v_D$  menyatakan frekuensi Debye yang diberikan oleh:

$$v_D^3 = \frac{9N}{4\pi V} \left( \frac{1}{v_l^3} + \frac{2}{v_t^3} \right)$$

Dimana  $N$  menyatakan jumlah atom yang terdapat pada pada kristal dengan volume  $V$ , serta  $v_l$  dan  $v_t$  menyatakan kecepatan gelombang suara longitudinal dan transversal pada kristal. Dengan mengganti  $v_l$  dan  $v_t$  dengan  $v_s$ , maka diperoleh:

$$v_D = v_s \left( \frac{3N}{4\pi V} \right)^{1/3}$$

$$\theta_D = \frac{h}{k_B} v_s \left( \frac{3N}{4\pi V} \right)^{1/3}$$

Tinjau untuk 1 mole atom:

$$\theta_D = \frac{h v_s}{k_B} \left( \frac{3N_a \rho}{4\pi M} \right)^{1/3}$$

Sehingga:

$$(\theta_D)_{Cu} = \frac{h}{k_B} (v_s)_{Cu} \left( \frac{3N_a \rho_{Cu}}{4\pi M_{Cu}} \right)^{1/3}$$

$$(\theta_D)_{Au} = \frac{h}{k_B} (v_s)_{Au} \left( \frac{3N_a \rho_{Au}}{4\pi M_{Au}} \right)^{1/3}$$

$$(\theta_D)_{Au} = (\theta_D)_{Cu} \frac{(v_s)_{Au}}{(v_s)_{Cu}} \left( \frac{M_{Cu} \rho_{Au}}{M_{Au} \rho_{Cu}} \right)^{1/3}$$

$$(\theta_D)_{Au} = 348 \left( \frac{2100}{3800} \right) \left( \frac{63.54 \times 1.93 \times 10^4}{197.0 \times 8960} \right)^{1/3} = 170 \text{ K}$$

- 3) Diketahui bahwa jari-jari ion-ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  adalah 0.98 dan 1.81 Å. Modulus Young untuk NaCl dalam arah [100] adalah  $5 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$ . Dengan asumsi bahwa perluasan arah [100] yang dihasilkan kontraksi diabaikan dalam arah tegak lurus, maka hitung panjang gelombang yang mana radiasi elektromagnetik sangat kuat dipantulkan oleh kristal NaCl. Massa atom Na dan Cl masing-masing 23 dan 35.5.

#### Pembahasan:

Frekuensi sangat kuat dipantulkan oleh kristal ionik dinyatakan sebagai:

$$\omega^2 = 2\beta \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right)$$

Dimana  $m$  dan  $M$  menyatakan massa masing-masing ion dan  $\beta$  konstanta gaya. Karena pelebaran arah [100] yang menghasilkan kontraksi yang diabaikan dalam arah tegak lurus, maka:

$$\beta = aY$$

Dimana  $a$  menyatakan jarak interatomik dan  $Y$  menyatakan modulus Young.

$$\omega^2 = 2aY \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right)$$

Jarak interatomik sepanjang arah [100] dari NaCl dinyatakan sebagai penjumlahan jari-jari ion  $\text{Ca}^+$  dan  $\text{Cl}^-$ :

$$\omega^2 = 2(0.98 + 1.81) \times 10^{-10} \times 5 \times 10^{10} \times \left( \frac{1}{23} + \frac{1}{35.5} \right) \times \frac{1}{1.67 \times 10^{-27}}$$

$$\omega = 3.46 \times 10^{13} \text{ rad/s}$$

Panjang gelombang elektromagnetik yang kuat dipantulkan oleh NaCl adalah:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi \times 3 \times 10^{10}}{3.46 \times 10^{13}} = 5.45 \times 10^{-3} \text{ m}$$

## 6. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang teori elektron bebas pada logam

### Soal:

- 1) Jari-jari atomik sodium adalah  $1.86 \text{ \AA}$ . Hitung energi Fermi sodium pada saat temperatur nol mutlak.

### Pembahasan:

Energi Fermi pada saat  $K = 0$  dinyatakan dengan hubungan:

$$E_{F0} = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{2/3}$$

Dimana  $N$  menyatakan sebagai elektron bebas (elektron valensi), dimana jumlah elektron valensi pada atom sodium adalah 2. Dengan memandang bahwa atom sodium memiliki struktur BCC, maka:

Jari-jari atom sodium,

$$r = 1.86 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Volume sel satuan,

$$V = a^3 = \left( \frac{4r}{\sqrt{3}} \right)^3 = \left( \frac{4 \times 1.86 \times 10^{-10}}{\sqrt{3}} \right)^3 = 7.93 \times 10^{-29} \text{ m}^3$$

$$\frac{N}{V} = \frac{2}{7.93 \times 10^{-29}} = 2.52 \times 10^{28} \text{ elektron/m}^3$$

Jadi:

$$E_{F0} = \frac{(1.05 \times 10^{-34})^2}{2(9.1 \times 10^{-31})} (3\pi^2 \times 2.52 \times 10^{28})^{2/3}$$

$$E_{F0} = 4.98 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.11 \text{ eV}$$

- 2) Turunkan hubungan tekanan terhadap volume untuk gas elektron bebas pada 0 K. Selanjutnya dapatkan hubungan untuk modulus bulk dalam bentuk energi kinetik rata-rata.

### Pembahasan:

Dari hubungan termodinamika diperoleh:

$$P = - \frac{\partial E}{\partial V}$$

Dimana  $E$  menyatakan energi internal sistem dengan partikel yang menempati volume  $V$  pada tekanan  $P$ , Untuk gas elektron bebas yang mengandung  $N$  elektron dengan energi kinetik rata-rata  $\bar{E}_0$  pada 0 K, selanjutnya energi  $E$  dapat digantikan dengan  $N\bar{E}_0$ , sehingga diperoleh:

$$P = -N \frac{\partial \bar{E}_0}{\partial V}$$

Oleh karena,

$$P = -\frac{3}{5} N \frac{\partial E_{F0}}{\partial V}$$

serta:

$$E_{F0} = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{2/3}$$

Yang memberikan:

$$\frac{\partial E_{F0}}{\partial V} = -\frac{2}{3} \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3} \left( \frac{1}{V} \right)^{5/3}$$

$$P = \frac{2}{5} N \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3} \left( \frac{1}{V} \right)^{5/3}$$

$$P = \frac{2}{5} N \frac{E_{F0}}{V}$$

Yang menyatakan hubungan antara tekanan terhadap volume untuk gas elektron bebas pada 0 K. Selanjutnya modulus Bulk dinyatakan dalam hubungan:

$$B = -V \frac{\partial P}{\partial V}$$

Turunkan tekanan  $P$  terhadap  $V$ , diperoleh:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = -\frac{5}{3} \left[ \frac{2}{5} N \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3} \right] \left( \frac{1}{V} \right)^{7/3} = -\frac{5P}{3V}$$

Sehingga:

$$B = -\frac{5}{3} P = \frac{2}{5} N \frac{E_{F0}}{V} = \frac{10}{9} N \frac{\bar{E}_0}{V} = \frac{10E}{9V}$$

- 3) Logam Na dengan struktur BCC memiliki dua atom per sel satuan. Jika jari-jari atom Na adalah  $1.85 \text{ \AA}$ . Hitung resistivitas elektriknya pada saat  $0^\circ \text{C}$  jika nilai klasik dari waktu bebas rata-rata pada temperatur ini adalah  $3 \times 10^{-14}$  detik.

**Pembahasan:**

Diberikan  $\tau = 3 \times 10^{-14}$  detik, Na memiliki 2 atom per sel satuan sehingga  $n = 2$ ,  $R_{Na} = 1.85 \text{ \AA} = 1.85 \times 10^{-10} \text{ m}$ .

Untuk struktur BCC berlaku:

$$\sqrt{3}a = 4R$$

$$a = \frac{4}{\sqrt{3}} R = \frac{4}{\sqrt{3}} (1.85 \times 10^{-10}) = 4.27 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Jumlah elektron per satuan volume dari atom Na:

$$n' = \frac{\rho N}{M} = \frac{n}{a^3} = \frac{2}{(4.27 \times 10^{-10})^3} = 2.57 \times 10^{28}/m^3$$

Resistivitas atom Na pada 0 °C diperoleh melalui persamaan:

$$\rho = \frac{m}{n'e^2\tau} = \frac{9.1 \times 10^{-31}}{2(.57 \times 10^{28})(1.6 \times 10^{-19})^2(3 \times 10^{-14})}$$

$$\rho = 4.46 \times 10^8 \Omega m$$

## 7. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami konsep pita energi elektron

**Soal:**

- 1) Buktikan bahwa potensial Kronig-Penney  $P \ll 1$ , dimana pita energi terendah pada  $k = 0$  dinyatakan dalam bentuk:

$$E = \frac{h^2 P}{4\pi^2 m a^2}$$

**Pembahasan:**

Untuk  $k = 0$ , berlaku:

$$\frac{P \sin \alpha a}{\alpha a} + \cos \alpha a = 1$$

$$\frac{P}{\alpha a} = \frac{1 - \cos \alpha a}{\sin \alpha a}$$

dimana:

$$\cos \alpha a = 1 - \frac{(\alpha a)^2}{2!} + \dots \cong 1 - \frac{\alpha^2 a^2}{2}$$

$$\sin \alpha a = \alpha a - \frac{(\alpha a)^3}{3!} + \dots \cong \alpha a$$

selanjutnya,

$$\frac{P}{\alpha a} = \frac{(\alpha a)^2}{2\alpha a} \rightarrow P = \frac{\alpha^2 a^2}{2}$$

akan tetapi,

$$\alpha^2 = \frac{8\pi^2 m E}{h^2}$$

sehingga:

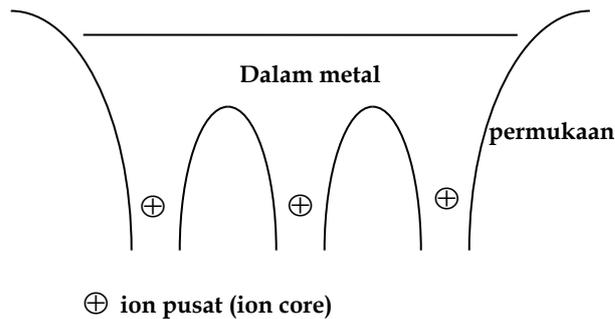
$$P = \frac{8\pi^2 m E a^2}{h^2} \frac{1}{2} \rightarrow E = \frac{h^2 P}{4\pi^2 m a^2}$$

- 2) Jelaskan secara singkat tentang model elektron hampir bebas (nearly free electron model) dalam menjelaskan keberadaan celah energi terlarang (energy gap) dalam zat padat yang membedakan sifat-sifat penghantarannya!

**Pembahasan:**

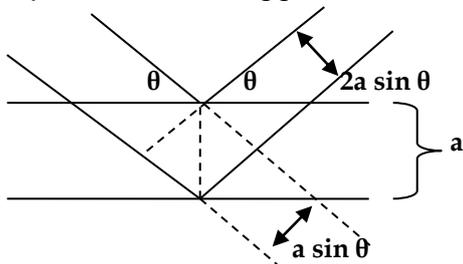
Prilaku elektron dalam sebuah bahan ditentukan oleh tegangan yang disebabkan oleh keadaan dari ikatan antar atom-atom yang tersusun,

dimana atom tidak termasuk pada sejumlah terbatas atom-atom yang menyusun zat padat. Seperti halnya pada ikatan kovalen tetapi terikat dan dimiliki bersama oleh atom-atom yang menyusunnya. Struktur pita dari kristal dapat dijelaskan dengan Model Elektron Hampir Bebas (Nearly Free Electron Model) yang mana pita elektron akan dinyatakan sebagai gangguan (perturbed) lemah oleh potensial periodik dari atom pusat (ion cores), Model ini menjawab semua pertanyaan yang muncul secara kualitatif mengenai perilaku elektron dalam metal.



Pemantulan Bragg (Bragg Reflection) merupakan ciri karakteristik dari perambatan gelombang dalam kristal, adanya pemantulan Bragg dari gelombang elektron dalam kristal yang menyebabkan timbulnya celah energi. Konsep Mekanika Kuantum dari persamaan Schrödinger tidak dapat membuktikan adanya celah energi. Dengan kata lain bahwa celah energi ini hanya terdapat pada elektron-elektron yang berada dalam medan tegangan periodik, sehingga disini dipakai pengertian kristal bukan zat padat secara umum karena pada kristal umumnya memiliki medan tegangan yang periodik. Konsep celah energi ini secara signifikan bisa digunakan untuk membedakan zat padat yang termasuk kategori konduktor maupun isolator.

Secara fisik, asal mula timbulnya celah energi dapat ditinjau untuk kisi zat padat linear dengan jarak antar kristal  $a$ , tetapi sebelumnya kita tinjau dulu pemantulan Bragg untuk kasus ini :



beda jalan =  $2a \sin \theta$   
 syarat terjadinya pemantulan :  
 $2a \sin \theta = n\lambda$   
 $2a \sin \theta = \frac{2\pi n}{k}$   
 $a \sin \theta = \frac{n\pi}{k} \rightarrow k = \frac{n\pi}{a \sin \theta}$

Jika dibuat grafik  $\epsilon_k$  terhadap  $k$  untuk elektron bebas akan kita lihat. Untuk elektron yang hampir bebas, ketika harga  $k$  mendekati  $\pi/a$ , maka energi  $\epsilon_k$  akan terus bertambah, tetapi untuk  $k = \pm\pi/a$ ,  $\epsilon_k$  memiliki dua harga yang bawah termasuk daerah Brillouin pertama dengan daerah antara

$\pi/a$  sampai  $-\pi/a$  dan yang atas termasuk daerah Brillouin kedua untuk kelipatan  $n$  bulat berikutnya, diantara kedua daerah ini terdapat celah terlarang, dimana setiap elektron tidak boleh memiliki keadaan energi ini. Syarat difraksi Bragg untuk difraksi gelombang dengan vektor gelombang  $\mathbf{k}$  akan menjadi satu dimensi :

$$(\mathbf{k} + \mathbf{G})^2 = \mathbf{k}^2$$

Jika  $G = 2\pi n/a$  , maka :

$$k = \pm \frac{1}{2} G = \pm n\pi/a$$

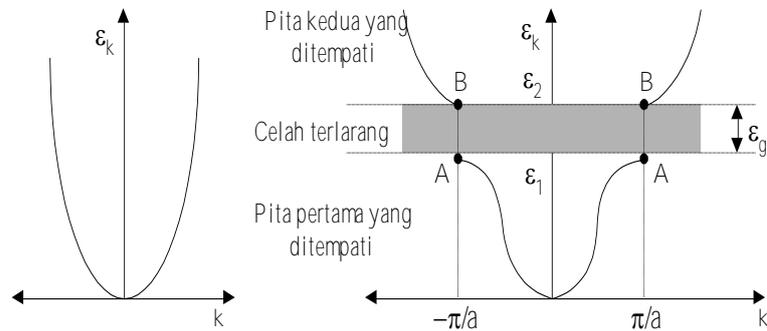
Loncatan energi pada daerah Brillouin merupakan akibat langsung dari fakta bahwa pembatasan harga  $k$  bersesuaian dengan gelombang berdiri (standing wave) dalam bentuk gelombang berjalan (traveling wave).

Tinjau gelombang berjalan dalam arah  $x$  yang dinyatakan dalam bentuk  $\exp(i\pi x/a)$  dan  $\exp(-i\pi x/a)$ . Pada saat  $k = \pm\pi/a$  gelombang tersebut akan terpantul Bragg bolak-balik, sehingga gelombang yang terbentuk akan memiliki dua kemungkinan yaitu :

$$\psi(+)=\exp(i\pi x/a)+\exp(-i\pi x/a)=2\cos(\pi x/a)$$

$$\psi(-)=\exp(i\pi x/a)-\exp(-i\pi x/a)=2i\sin(\pi x/a)$$

tanda (+) dan (-) menunjukkan arah bolak-balik dari  $-x$  ke  $+x$  dan sebaliknya.



- 3) Jelaskan beberapa kelemahan penggunaan model elektron bebas (*free electron model*) dalam menjelaskan sifat-sifat zat padat secara keseluruhan!

**Pembahasan:**

Beberapa kelemahan model ini diantaranya:

- Tidak bisa menjelaskan tentang perbedaan antara metal, semimetal, semikonduktor dan isolator.
- Tidak bisa menjelaskan keberadaan muatan positif dari koefisien Hall.
- Tidak bisa menjelaskan hubungan antara elektron konduksi dalam metal dengan elektron valensi dari atom bebas.
- Tidak bisa menjelaskan tentang adanya proses/gejala transport yang terjadi dalam zat padat.

Elektron dalam kristal zat padat akan tersusun dalam pita-pita energi yang dipisahkan oleh daerah energi dimana tidak terdapat orbital gelombang elektron, celah ini disebut celah terlarang (energy gap) atau celah pita (band gap) yang merupakan hasil interaksi dari gelombang elektron konduksi dengan ion pusat (ion cores) dalam kristal. Hal inilah yang tidak bisa dijelaskan oleh Model Elektron Bebas.

- 4) Model elektron bebas untuk logam, mengasumsikan bahwa elektron konduksi dapat diaproksimasikan dengan gas elektron bebas, dimana parameter untuk gas yang penting yaitu  $n$  jumlah kerapatan elektron dan  $\tau$  waktu antar tumbukan elektron. Tunjukkan bahwa konduktivitas listrik dari model ini untuk logam dinyatakan dengan persamaan :

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

Jika diketahui resistivitas logam Cu  $1.7 \times 10^{-6}$  Ohm cm dan kerapatan atom Cu  $8.5 \times 10^{28}$  atom/cm<sup>3</sup>, perkirakan waktu tumbukan  $\tau$  dari elektron Cu.

**Pembahasan:**

Momentum elektron bebas  $\vec{p}$  dan vektor gelombang  $\vec{k}$  dinyatakan dengan hubungan :

$$\vec{p} = \hbar\vec{k}$$

persamaan gerak elektron akibat pengaruh medan gaya  $\vec{F}$  dinyatakan dengan hukum II Newton:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \hbar \frac{d\vec{k}}{dt}$$

vektor gelombang semua elektron akan meningkat dengan bertambahnya  $\vec{F}$ , keadaan setimbang akan dicapai jika elektron kembali ke keadaan semula akibat tumbukan dengan ion-ion kisi yang dikenal dengan istilah waktu relaksasi tumbukan  $\tau$ , yang dinyatakan dengan :

$$\delta\vec{k} = \frac{\tau}{\hbar} \vec{F}$$

dimana  $\delta\vec{k}$  adalah perubahan vektor gelombang  $\vec{k}$  dari nilai setimbangnya, bersesuaian dengan itu perubahan kecepatan :

$$\begin{aligned} \delta\vec{v} &= \frac{\delta\vec{p}}{m} = \frac{\hbar}{m} \delta\vec{k} \\ &= \frac{\tau\vec{F}}{m} \end{aligned}$$

gaya yang bekerja pada elektron dalam medan listrik  $\vec{\xi}$  :

$$\vec{F} = -e\vec{\xi}$$

kerapatan arus induksi dinyatakan dengan :

$$\vec{J} = -ne\delta\vec{v} = \frac{ne^2\tau}{m}\vec{\xi} = \sigma\vec{\xi}$$

dimana konduktivitas logam dinyatakan sebagai :

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

jika setiap satu elektron bebas berkontribusi dalam tiap atom Cu, maka  $n = 8.5 \times 10^{28} / m^3$ , sehingga waktu tumbukan  $\tau$  :

$$\tau = \frac{m\sigma}{ne^2} = \frac{m}{ne^2\rho} = \frac{(9.11 \times 10^{-31})}{(8.5 \times 10^{28})(1.6 \times 10^{-29})(1.7 \times 10^{-8})} = 2.5 \times 10^{-14} \text{ s}$$

## 8. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi

**Soal:**

- 1) Energi yang berdekatan dengan ujung pita valensi pada suatu kristal dinyatakan sebagai:

$$E = -AK^2$$

Dimana  $A = 10^{-39} \text{ Jm}^2$ . Sebuah elektron dengan vektor gelombang  $\mathbf{k} = 10^{10} \mathbf{k}_x \text{ m}^{-1}$  telah terhapus dari orbital pada pita valensi yang terisi penuh. Tentukan massa efektif, kecepatan, momentum dan energi hole.

**Pembahasan:**

Diketahui:

$$E = -AK^2$$

$$\frac{dE}{dk} = -2AK \rightarrow \frac{d^2E}{dk^2} = -2A$$

Jika diketahui massa efektif elektron dinyatakan sebagai:

$$m_e^* = \frac{\hbar^2}{\left(\frac{d^2E}{dk^2}\right)} = -\frac{\hbar^2}{2A} = \frac{(1.05 \times 10^{-34})}{2 \times 10^{-39}} = -5.5 \times 10^{30} \text{ kg}$$

Karena massa efektif hole berlawanan dengan massa efektif elektron pada lokasi yang sama pada pita energi, sehingga massa efektif hole menjadi:

$$m_h^* = -m_e^* = 5.5 \times 10^{30} \text{ kg}$$

Vektor gelombang hole juga berlawanan dengan vektor gelombang elektron :

$$\mathbf{k}_h = -\mathbf{k}_e = -10^{10} \mathbf{k}_x \text{ m}^{-1}$$

Momentum hole:

$$\mathbf{p}_h = \hbar\mathbf{k} = -1.05 \times 10^{-34} \times 10^{10} \mathbf{k}_x = -1.05 \times 10^{-24} \mathbf{k}_x \text{ Jsm}^{-1}$$

Kecepatan hole:

$$\mathbf{v}_h = \frac{\mathbf{p}_h}{m_h^*} = -\frac{1.05 \times 10^{-24} \mathbf{k}_x}{5.5 \times 10^{30}} = -1.9 \times 10^5 \mathbf{k}_x \text{ ms}^{-1}$$

Energi elektron dengan vektor gelombang  $\mathbf{k}_e$  adalah:

$$E_e = -Ak_e^2 = -10^{-39} \times (10^{10} \mathbf{k}_x)^2 = -10^{-19} \text{ J}$$

Sehingga energi hole menjadi:

$$E_h = -E_e = 10^{-19} \text{ J}$$

- 2) Dalam pita energi elektron bergerak dalam bentuk paket gelombang, akibat pengaruh medan listrik  $\vec{\xi}$ . Buktikan bahwa persamaan gerak elektron tersebut dinyatakan dalam bentuk :

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{F}$$

**Pembahasan:**

Kecepatan group gelombang :

$$\vec{v}_g = \frac{d\vec{\omega}}{d\vec{k}}$$

frekuensi diasosiasikan dengan fungsi gelombang dengan energi  $\epsilon$  :

$$\omega = \frac{\epsilon}{\hbar}$$

maka :

$$\vec{v}_g = \frac{1}{\hbar} \frac{d\epsilon}{d\vec{k}} \quad \text{atau} \quad \vec{v} = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\vec{k}} \epsilon(\vec{k})$$

pengaruh kristal terhadap gerak elektron menghasilkan hubungan dispersi  $\epsilon(\vec{k})$ . Kerja yang dilakukan  $\delta \epsilon$  pada elektron oleh medan listrik  $\vec{\xi}$  pada interval  $\delta t$  :

$$\delta \epsilon = -e \vec{\xi} \vec{v}_g \delta t$$

misalkan bahwa :

$$\delta \epsilon = \left( \frac{d\epsilon}{d\vec{k}} \right) \delta \vec{k} = \hbar \vec{v}_g \delta \vec{k}$$

akan diperoleh :

$$\delta \vec{k} = - \left( \frac{e \vec{\xi}}{\hbar} \right) \delta t$$

$$\hbar \frac{\delta \vec{k}}{\delta t} = -e \vec{\xi}$$

suku kanan tidak lain adalah bentuk gaya eksternal akibat medan  $\vec{\xi}$ , sehingga :

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{F}$$

- 3) Buktikan bahwa jumlah orbital per satuan energi pada tingkat energi Fermi adalah merupakan jumlah total elektron konduksi dibagi dengan energi Fermi, secara matematis dinyatakan sebagai :

$$D(\epsilon) \equiv \frac{dN}{d\epsilon} = \frac{3N}{2\epsilon}$$

**Pembahasan:**

Tinjau persamaan Schrödinger 3D untuk partikel bebas :

$$-\frac{\hbar}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi_k(\vec{r}) = \epsilon_k \psi_k(\vec{r})$$

jika elektron berada dalam kubus dengan sisi  $L$ , maka fungsi gelombangnya dinyatakan sebagai gelombang berdiri :

$$\psi_n(\vec{r}) = A \sin\left(\frac{\pi n_x x}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi n_y y}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi n_z z}{L}\right)$$

dimana  $n_x, n_y, n_z$  bilangan bulat positif.

Dengan menggunakan syarat batas periodik, maka fungsi gelombang periodik dinyatakan dalam  $x, y, z$  dengan perioda  $L$  :

$$\psi(x+L, y, z) = \psi(x, y, z)$$

hal ini berlaku untuk koordinat  $y, z$ . Fungsi gelombang memenuhi persamaan Schrödinger untuk partikel bebas dan syarat periodisitas dalam bentuk gelombang bidang menjalar (traveling plane wave) :

$$\psi_k(\vec{r}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r})$$

dengan komponen vektor gelombang  $\vec{k}$  memenuhi :

$$k_x = 0; \quad \pm \frac{2\pi}{L}; \quad \pm \frac{4\pi}{L}; \quad \dots\dots\dots$$

sama halnya untuk komponen  $k_y$  dan  $k_z$ .

Setiap komponen  $\vec{k}$  dinyatakan dalam bentuk  $\frac{2n\pi}{L}$ , dimana  $n$  bilangan bulat positif atau negatif dan mencirikan bilangan kuantum, sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned} \exp(ik_x(x+L)) &= \exp\left(i \frac{2n\pi(x+L)}{L}\right) \\ &= \exp\left(i \frac{2n\pi x}{L}\right) \exp(i2n\pi) = \exp(ik_x x) \end{aligned}$$

Energi orbital  $\epsilon_k$  dengan vektor gelombang  $\vec{k}$  :

$$\epsilon_k = \frac{\hbar^2}{2m} k^2 = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

dalam hal ini  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

Momentum linear  $\vec{p}$ , dinyatakan dalam Mekanika Kuantum sebagai operator  $\vec{p} = -i\hbar\nabla$ , sehingga :

$$p\psi_k(\vec{r}) = -i\hbar\nabla\psi_k(\vec{r}) = \hbar\vec{k}\psi_k(\vec{r})$$

Gelombang bidang  $\psi_k(\vec{r})$  adalah fungsi eigen momentum linear dengan nilai eigen  $\hbar k$ . Kecepatan partikel dalam orbital  $\vec{k}$  diberikan oleh :

$$v = \frac{\hbar k}{m}$$

Dalam keadaan dasar (ground state) sistem dengan  $N$  elektron bebas menempati orbital berupa titik-titik dalam ruang bola  $\vec{k}$ , tingkat energi Fermi terletak dipermukaan bola dengan vektor gelombang  $\vec{k}_F$  :

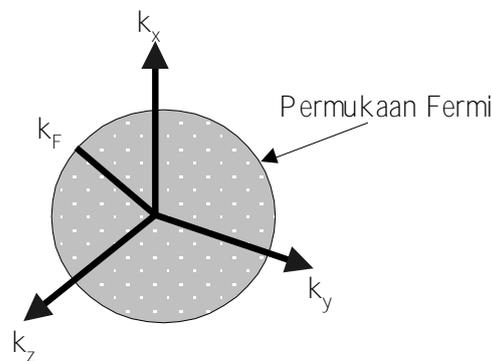
$$\epsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} k_F^2$$

Jumlah total orbital yang ditempati elektron dalam ruang  $\vec{k}$  dinyatakan sebagai :

$$N = 2 \cdot \frac{4\pi k_F^3 / 3}{(2\pi/L)^3} = \frac{V}{3\pi^2} k_F^3$$

dimana faktor 2 menunjukkan dua nilai yang mungkin ditempati oleh  $m_s$  bilangan kuantum spin. Setiap tingkat orbital yang ditempati akan memiliki nilai  $k$  yang bergantung pada konsentrasi partikel :

$$k_F = \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{1/3}$$



sehingga :

$$\epsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{2/3}$$

yang menyatakan hubungan antara tingkat Fermi dengan konsentrasi elektron  $N/V$ , kecepatan elektron dalam permukaan Fermi :

$$v_F = \left( \frac{\hbar k_F}{m} \right) = \left( \frac{\hbar}{m} \right) \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{1/3}$$

jika  $D(\epsilon)$  menyatakan rapat keadaan, maka jumlah orbital per satuan energi dinyatakan sebagai :

$$N = \frac{V}{3\pi^2} \left( \frac{2m\epsilon}{\hbar^2} \right)^{3/2} \quad *)$$

maka :

$$D(\epsilon) \equiv \frac{dN}{d\epsilon} = \frac{V}{2\pi^2} \left( \frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \epsilon^{1/2}$$

jika persamaan \*) dapat disederhanakan menjadi :

$$\ln N = \frac{3}{2} \ln \epsilon + K$$

dengan  $K$  suatu konstanta, sehingga :

$$\frac{dN}{N} = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon}{\epsilon}$$

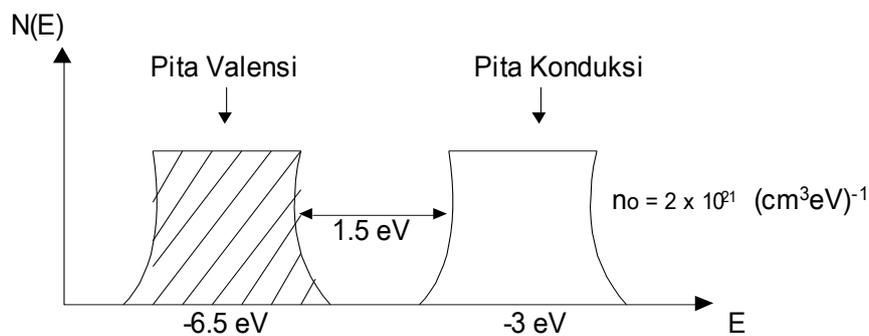
akan didapatkan :

$$D(\epsilon) = \frac{dN}{d\epsilon} = \frac{3N}{2\epsilon}$$

## 9. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor

### Soal:

- 1) Tinjau suatu semikonduktor intrinsik dengan fungsi rapat keadaan  $N(E)$  seperti yang ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :
  - a. Dimana tingkat energi Fermi terhadap pita valensi dan pita konduksi ?
  - b. Hitung kerapatan elektron dalam pita konduksi pada temperatur kamar ?



### Pembahasan:

- a. Jumlah elektron dalam pita konduksi dengan tingkat energi  $\epsilon_C$  dan jumlah hole dalam pita valensi dengan tingkat energi  $\epsilon_V$  dinyatakan sebagai :

$$n = \int_{\epsilon_C}^{\infty} N(E) f(E) dE$$

$$p = \int_{-\infty}^{\epsilon_V} N(E) (1 - f(E)) dE$$

fungsi distribusi Fermi-Dirac dinyatakan sebagai :

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

fungsi ini menyatakan probabilitas bahwa suatu tingkat energi  $E$  ditempati. Untuk Semikonduktor intrinsik  $n = p$ . Tinjau kasus dimana

$E - E_F \gg k_B T$ , maka :

$$f(E) = e^{-(E-E_F)/k_B T}$$

maka :

$$\begin{aligned} n &\cong \int_{\varepsilon_C}^{\infty} n_o e^{-(E-E_F)/k_B T} dE \\ &\cong n_o k_B T e^{-(\varepsilon_C-E_F)/k_B T} \\ p &\cong n_o k_B T e^{-(E_F-\varepsilon_V)/k_B T} \end{aligned}$$

dengan  $n_o$  rapat keadaan elektron, oleh karena  $n = p$ , maka :

$$E_F = \frac{\varepsilon_C + \varepsilon_V}{2}$$

b. Dari hubungan :

$$\varepsilon_C - \varepsilon_F \cong \frac{E_g}{2} = 0.75 \text{ eV}$$

Pada temperatur kamar  $k_B T = 1/40$ , maka rapat elektron konduksi :

$$n \cong n_o k_B T \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{k_B T}\right) \cong 4.68 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

- 2) Sebuah SK Intrinsik (kristal Si) didoping dengan  $10^{16}$  atom/cm<sup>3</sup> Arsenik (As). Tentukan konsentrasi pembawa dan tingkat energi Fermi pada temperatur kamar dan gambarkan diagram energinya!

**Pembahasan:**

Atom Si merupakan atom bervalensi empat (tetravalent) didoping dengan atom bervalensi lima (As), maka akan terdapat satu elektron valensi yang berubah menjadi elektron konduksi, semikonduktor yang dihasilkan adalah tipe-n pada suhu kamar (300 K), semua atom pengotor tersebut diionisasikan sempurna, sehingga :

$$n \cong N_D = 10^6 \text{ cm}^{-3}$$

gunakan hukum aksi massa :

$$\begin{aligned} n_i^2 &= np \\ p &\cong \frac{n_i^2}{N_D} \end{aligned}$$

pada suhu kamar, rapat pembawa intrinsik untuk Si  $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  dan rapat keadaan dalam pita konduksi  $2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  (Sze,1985), sehingga konsentrasi pembawa hole :

$$p \cong \frac{(1.45 \times 10^{10})^2}{10^{16}} = 2.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

gunakan persamaan :

$$\begin{aligned} E_C - E_F &= k_B T \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) = (8.64 \times 10^{-5})(300) \ln\left(\frac{2.8 \times 10^{19}}{10^{16}}\right) \\ &= (0.0259) \ln(2.8) = 0.206 \text{ eV} \end{aligned}$$

Tingkat Fermi diukur dari tingkat Fermi intrinsik, gunakan persamaan :

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_B T}\right)$$

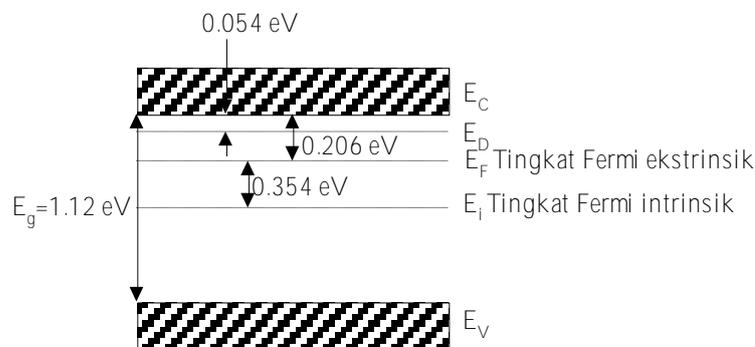
logaritmankan kedua ruas, sehingga diperoleh :

$$\ln n = \ln n_i + \frac{E_F - E_i}{k_B T}$$

$$E_F - E_i = k_B T \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \cong k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

$$E_F - E_i \cong (0.0259) \ln\left(\frac{10^{16}}{1.45 \times 10^{10}}\right) \cong 0.354 \text{ eV}$$

Diagram tingkat energi :



3) Kristal Silikon dengan energi gap  $\varepsilon_G = 1.14 \text{ eV}$ , massa efektif hole diambil  $m_h = 0.3m$  dan massa efektif elektron  $m_e = 0.2m$

a. Turunkan pernyataan untuk fungsi  $f(T)$  dalam hukum aksi massa :

$$np = f(T)$$

dimana  $n$  dan  $p$  konsentrasi elektron dan hole, serta  $T$  suhu. (Gunakan

$$\int_0^{\infty} x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{2}})$$

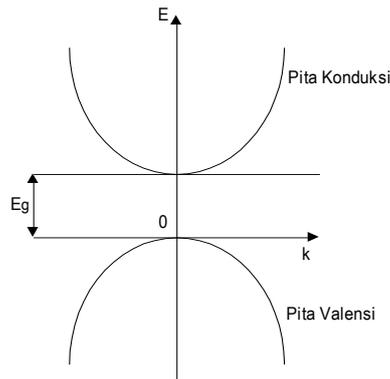
b. Konsentrasi  $N_D$  dari donor pentavalent As harus ditambahkan untuk menghasilkan konduktivitas ekstrinsik  $10^4$  kali lebih besar dari

konduktivitas intrinsiknya pada temperatur kamar ?. (abaikan pengotor akseptor).

**Pembahasan:**

- a. Dekat dengan bagian bawah pita konduksi, vektor gelombang elektron  $\vec{k}$  memiliki energi :

$$E(\vec{k}) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}$$



jumlah keadaan persatuan volume dalam semikonduktor dalam jangkauan  $k$  dan  $k + dk$  :

$$\frac{4\pi k^2 dk}{(2\pi)^3} = \frac{1}{4\pi^2} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2} dE$$

tiap  $\vec{k}$  bersesuaian dengan dua keadaan spin, maka rapat keadaan persatuan interval :

$$g(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2}$$

jika sistem berada dalam keadaan keseimbangan thermal pada suhu  $T$ , maka elektron memenuhi distribusi Fermi :

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

dalam semikonduktor tingkat Fermi  $E_F$  biasanya terletak dalam pita terlarang antara pita valensi dan konduksi yang jaraknya lebih besar dari  $k_B T$ ,  $E - E_F \gg k_B T$ , maka :

$$f(E) \cong e^{(E_F - E)/k_B T}$$

konsentrasi elektron dalam pita konduksi :

$$n = \int_{E_g}^{\infty} f(E)g(E)dE$$

$$\cong \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_g}^{\infty} (E - E_g)^{1/2} e^{(E_F - E)/k_B T} dE$$

$$\cong \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e k_B T}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - E)/k_B T} \int_{E_g}^{\infty} e^{-x} x^{1/2} dx$$

dengan  $x = \frac{(E - E_g)}{k_B T}$ , maka :

$$n \cong N_C e^{-(E_g - E_F)/k_B T}$$

$$\text{dengan } N_C = 2 \left( \frac{m_e k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

konsentrasi hole dinyatakan sebagai :

$$p = \int_{-\infty}^0 f_h(E) g_h(E) dE$$

dimana :

$$f_h(E) = 1 - f(E) \cong e^{-(E_F - E)/k_B T}$$

$$g_h(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_h}{\hbar^2} \right)^{3/2} (-E)^{1/2}$$

akan diperoleh :

$$p \cong N_h e^{-E_F/k_B T}$$

dengan :

$$N_h = 2 \left( \frac{m_h k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

sehingga :

$$\begin{aligned} f(T) = np &\cong N_e N_h e^{-E_g/k_B T} \\ &\cong 4(m_e m_h)^{3/2} \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/k_B T} \end{aligned}$$

- c. Pernyataan  $np = f(T)$  menunjukkan bahwa pada temperatur definit dan semikonduktor tak terdegenerasi, perkalian konsentrasi pembawa pada kesetimbangan thermal tak bergantung pada keadaan pengotor (impurity) yang diberikan. Untuk semikonduktor intrinsik dimana  $np = n_i$ , maka konduktivitas dinyatakan sebagai :

$$\sigma_i = en_i(\mu_e + \mu_h) \cong 2en_i\mu_e$$

donor As adalah pentavalent, sementara akseptor Si adalah tetravalent, jadi setiap atom donor akan memberikan satu elektron bebas pada temperatur kamar, jadi  $n \cong N_D$  dengan mengabaikan efek pengotor akseptor, maka konduktivitas bahwa :

$$\sigma = e\mu_e N_D$$

jadi :

$$\frac{\sigma}{\sigma_i} = \frac{N_D}{2n_i} = 10^4 \rightarrow N_D = 2 \times 10^4 n_i$$

gunakan hubungan :

$$\begin{aligned} n_i &= \sqrt{f(T)} = 2(m_e m_h)^{3/4} \left( \frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_g / k_B T} \\ &= 2(0.2 \times 0.3)^{3/4} \left( \frac{k_B T m c^2}{2\pi \hbar^2 c^2} \right)^{3/2} e^{-E_g / k_B T} \end{aligned}$$

dimana :

$$k_B T \cong 1/40 \text{ eV} \quad (\text{pada suhu kamar})$$

$$E_g = 1.14 \text{ eV} \quad (\text{untuk Si})$$

$$m c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

$$\hbar = 6.582 \times 10^{-16} \text{ eVs}$$

jadi :

$$\begin{aligned} n_i &= \sqrt{f(T)} = 2(m_e m_h)^{3/4} \left( \frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_g / k_B T} \\ &= 2(0.2 \times 0.3)^{3/4} \left( \frac{0.511 \times 10^6}{80\pi} \right)^{3/2} \left( \frac{1}{6.58 \times 10^{-16} \times 3 \times 10^8} \right) e^{-22.8} \\ &= 3.62 \times 10^{14} \text{ m}^{-3} \end{aligned}$$

maka akan diperoleh :

$$N_D = 7.2 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$$

4) Dalam semikonduktor tipe-n, hubungan  $E$  terhadap  $k$  untuk elektron dalam pita konduksi dinyatakan sebagai :

$$E = a k^2 + C \quad ; C \text{ konstanta}$$

resonansi siklotron untuk elektron dalam medan magnet  $B = 0.1 \text{ Wb} / \text{m}^2$  terjadi frekuensi angular  $\omega_c = 1.8 \times 10^{11} \text{ rads}^{-1}$ .

a. Tentukan nilai  $a$

b. Dengan mengasumsikan bahwa semikonduktor didoping dengan donor pentavalent. Perkirakan jumlah donor per  $\text{m}^3$  diberikan koefisien Hall pada suhu kamar  $R_H = 6.25 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ C}^{-1}$

**Pembahasan:**

a. Massa efektif dalam pita konduksi dinyatakan dengan :

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2}$$

tinjau persamaan :

$$E = ak^2 + C \quad ; \quad \frac{\partial E}{\partial k} = 2ak \quad ; \quad \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} = 2a$$

maka :

$$\frac{1}{m^*} = \frac{2a}{\hbar^2}$$

frekuensi resonansi siklotron untuk elektron :

$$\omega_c = \frac{eB}{m^*} \rightarrow \rightarrow \omega_c = \frac{2aeB}{\hbar^2}$$

maka :

$$a = \frac{\hbar^2 \omega_c}{2 eB} = \frac{(1.05 \times 10^{-34})^2 (1.8 \times 10^{11})}{2(1.6 \times 10^{-19})(0.1)} = 6.2 \times 10^{-38} \text{ Jm}^2$$

b. Untuk semikonduktor tipe-n berlaku  $n \gg p$ , maka :

$$R_H \cong -\frac{1}{ne}$$

pada temperatur kamar, atom pengotor selalu berada dalam keadaan terionisasi, sehingga jumlah kerapatan pengotor

- 5) Sebuah semikonduktor didoping dengan ketidamurnian Fospor sebanyak  $10^{16}$  atom/cm<sup>3</sup> sehingga dihasilkan semikonduktor tipe-n. Turunkan pernyataan untuk menyatakan resistivitas semikonduktor tipe-n tersebut dan berapa besar resistivitas bahan tersebut pada suhu kamar !

**Pembahasan:**

Dalam medan listrik  $\vec{\xi}$  elektron akan bergerak dan gaya eksternal yang timbul :

$$\vec{F} = -e\vec{\xi} = -(\text{Gradien energi potensial elektron})$$

jika menyatakan hubungan :

$$\vec{\xi} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$

ambil bahwa  $\psi$  potensial elektrostatik dengan gradien negatif sama dengan medan listrik :

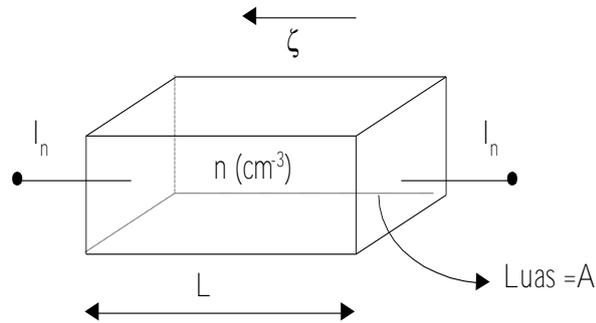
$$\vec{\xi} \equiv -\frac{d\psi}{dx}$$

sehingga diperoleh :

$$\psi = -\frac{E_i}{q}$$

yang menunjukkan hubungan antara potensial elektrostatik dengan energi potensial elektron. Asumsikan bahwa semikonduktor adalah homogen, maka energi potensial  $E_i$  menurun secara linear terhadap jarak, dalam hal

ini medan listrik konstan dalam arah x negatif. Transport pembawa dibawah pengaruh medan listrik akan menghasilkan arus yang disebut arus hanyut (drift current), tinjau gambar di bawah ini :



merupakan sampel dengan luas penampang  $A$ , panjang  $L$  dan konsentrasi pembawa  $n$ . Jika sampel diberikan medan listrik  $\vec{\xi}$ , maka rapat arus elektron  $\vec{J}_n$  akan mengalir dalam sampel yang dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned} \vec{J}_n &= \frac{I_n}{A} = \sum_{i=0}^N (-qv_i) \\ &= -qn\vec{v}_n = qn\mu_n\vec{\xi} \end{aligned}$$

dimana  $I_n$  arus elektron.

Dengan cara yang sama, maka rapat arus untuk hole dinyatakan sebagai :

$$\vec{J}_p = qp\vec{v}_p = qp\mu_p\vec{\xi}$$

total arus yang mengalir dalam semikonduktor akibat pengaruh medan listrik merupakan jumlah arus elektron dan hole :

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = (qn\mu_n + qp\mu_p)\vec{\xi}$$

dimana suku dalam tanda ( ) merupakan suku konduktivitas :

$$\sigma = (qn\mu_n + qp\mu_p)$$

hubungan antara resistivitas dengan konduktivitas merupakan hubungan terbalik dinyatakan sebagai :

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

sehingga :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{(qn\mu_n + qp\mu_p)}$$

untuk semikonduktor tipe-n :

$$\rho_n = \frac{1}{\sigma_n} = \frac{1}{(qn\mu_n)}$$

dengan  $\mu_n$  menyatakan mobilitas elektron.

Dengan mengasumsikan bahwa pada suhu kamar, semua donor terionisasi sempurna, maka :

$$n \cong N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

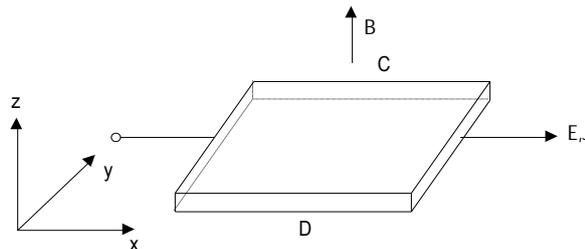
mobilitas elektron  $\mu_n$  untuk Si  $1350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ , maka :

$$\rho = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(10^{16})(1350)} \cong 0.46 \Omega \text{ cm}$$

- 6) Turunkan pernyataan untuk koefisien Hall bagi semikonduktor intrinsik dalam bentuk mobilitas elektron dan hole, serta kerapatan pembawa muatan ?

**Pembahasan:**

Tinjau gambar dibawah ini :



Bidang merupakan sampel semikonduktor intrinsik yang terletak dalam bidang xy. Semikonduktor intrinsik dimasukkan dalam sistem dibawah pengaruh medan listrik  $\vec{E}_x$  dan medan magnet  $\vec{B}_z$ .

Akibat pengaruh medan listrik ini menyebabkan elektron bergerak dalam arah sumbu x negatif dan hole bergerak ke arah sumbu x positif (sesuai arah medan listrik). Medan magnet menyebabkan elektron dan hole akan menyimpang dalam arah sumbu y negatif, karena timbul gaya Lorentz  $q\vec{v} \times \vec{B}$  ke arah D, elektron dan hole keduanya saling meniadakan yang timbul akibat adanya akumulasi muatan total di sisi D, karena proses saling meniadakan yang tidak sempurna yang sama dengan sisi C, tetapi berlawanan tanda. Hal ini akan menghasilkan medan listrik yaitu medan Hall dalam arah y.

Jika konduktivitas listrik semikonduktor dinyatakan sebagai :

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

dengan  $n, p$  masing-masing konsentrasi elektron dan hole, serta  $\mu_n, \mu_p$  adalah mobilitas pembawa yang didefinisikan sebagai kecepatan persatuan kuat medan yang searah dengan medan tersebut.

Untuk keadaan tunak (*steady state*) tidak terdapat arus dalam arah y, akan tetapi arus hole dan elektron secara individu tidak nol. Dengan mendefinisikan  $(J_p)_y$  dan  $(J_n)_y$  sebagai rapat arus hole dan elektron, maka :

$$\begin{aligned} (J_p)_y &= pq\mu_p \epsilon_y - pq\mu_p (v_p)_x B_z \\ &= pq\mu_p \epsilon_y - pq\mu_p^2 E_x B_z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(J_p)_y &= nq\mu_n \epsilon_y - nq\mu_n (v_n)_x B_z \\ &= nq\mu_n \epsilon_y + nq\mu_n^2 E_x B_z\end{aligned}$$

dalam keadaan tunak :

$$J_y = (J_p)_y + (J_n)_y = 0$$

sehingga :

$$\epsilon_y = \left( \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{p\mu_p + n\mu_n} \right) E_x B_z$$

koefisien Hall didefinisikan sebagai :

$$\text{Koefisien Hall} = \frac{\epsilon_y}{J_x B_x}$$

maka :

$$R_H = \frac{1}{q} \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)}{(p\mu_p + n\mu_n)^2}$$

oleh karena :

$$J_x = \sigma E_x$$

maka untuk semikonduktor intrinsik akan berlaku :  $n = p$  , akan diperoleh :

$$R_H = \frac{1}{qn} \frac{(p\mu_p - n\mu_n)}{(p\mu_p + n\mu_n)}$$

- 7) Germanium (Ge) merupakan semikonduktor intrinsik dengan rapat muatan  $2.4 \times 10^{19}$  muatan per  $\text{m}^3$  pada temperatur 300 K. Bahan tersebut akan dibuat jenis semikonduktor ekstrinsik dengan menambahkan ketidakmurnian p Indium pada laju atom Indium sekitar  $4 \times 10^8$  per atom Germanium. Jika terdapat sekitar  $4.4 \times 10^{28}$  atom Germanium per  $\text{m}^3$ , maka tentukan konsentrasi pembawa muatan minoritasnya dan bahas hasilnya!.

#### **Pembahasan:**

Untuk bahan semikonduktor tipe-p diperoleh bahwa pembawa muatan negatif ( $N_D$ ) sama dengan nol, sehingga pembawa muatan positif ( $N_A$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$N_A = \frac{4.4 \times 10^{28}}{4 \times 10^8} = 1.10 \times 10^{20} \text{ per m}^3$$

$$n_i^2 = n_p p_p = 5.76 \times 10^{38}$$

Pembawa muatan mayoritas:

$$p_p \cong N_A + \frac{n_i^2}{N_A} = 1.10 \times 10^{20} + \frac{5.76 \times 10^{38}}{1.10 \times 10^{20}} = 1.15 \times 10^{20} = N_A$$

Pembawa muatan minoritas:

$$n_p \cong \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{5.76 \times 10^{38}}{1.10 \times 10^{20}} = 5.24 \times 10^{18}$$

sehingga:

$$\frac{n_i}{n_p} \cong \frac{2.4 \times 10^{19}}{5.24 \times 10^{18}} \cong 5$$

Sehingga jumlah konsentrasi pembawa muatan mayoritas ( $n_p$ ) sekitar seper lima kali pembawa muatan intrinsiknya ( $n_i$ ), dengan demikian konsentrasi pembawa muatan minoritas berkurang sekitar seper lima kali nilai intrinsiknya.

## 10. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan

### Soal:

- 1) Jelaskan klasifikasi bahan magnetik berdasarkan harga suseptibilitas magnetik ( $\chi = M/B$ ) dan sebutkan beberapa contohnya !

### Pembahasan:

Bahan magnetik berdasarkan harga suseptibilitas magnetik ( $\chi = M/B$ ) terbagi atas :

- Bahan paramagnetik : Bahan dengan harga  $\chi$  positif (dimana  $M$  paralel terhadap  $B$ ), dengan kulit atom terisi sebagian. Contoh: Al ( $\chi = +2.2 \times 10^{-5}$ ), Mn ( $\chi = +98 \times 10^{-5}$ ), W ( $\chi = +36 \times 10^{-5}$ ).
- Bahan diamagnetik : Bahan dengan harga  $\chi$  negatif (dimana  $M$  berlawanan terhadap  $B$ ), dengan kulit atom terisi penuh. Contoh: Cu ( $\chi = -1.0 \times 10^{-5}$ ), Au ( $\chi = -3.6 \times 10^{-5}$ ), air ( $\chi = -9.0 \times 10^{-5}$ ).

Bahan feromagnetik : Bahan dengan harga  $\chi$  besar ( $\cong 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ), sehingga bahan ini akan termagnetisasi secara spontan. Contoh : Fe, Co, dan Ni

- 2) Jika kristal besi termagnetisasi total secara spontan, perkirakan hasil magnetisasi tersebut dengan menggunakan nilai-nilai yang sesuai :  $\rho_{besi} = 7.9$  (berat spesifik), berat atom besi ( $A$ ) = 56 dan bilangan Avogadro ( $N_A$ ) =  $6.02 \times 10^{23}$  !.

### Pembahasan:

Jumlah atom per satuan volume pada kristal besi :

$$n = \frac{\rho N_A}{A} = \frac{7.9}{56} \times (6.02 \times 10^{23}) = 8.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} = 8.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

momen magnetik tiap atom besi adalah sekitar  $\mu_o = 2.2\mu_B$ , dengan  $\mu_B$  magneton Bohr, sehingga momen magnetik per satuan volume atau magnetisasi menjadi :

$$\begin{aligned} M &\approx n\mu_o = 2.2n\mu_B = (2.2)(8.5 \times 10^{28})(9.3 \times 10^{-24}) \\ &= 1.74 \times 10^6 \text{ Am}^{-1} \end{aligned}$$

3) Sebuah elektron bersirkulasi dalam medan magnetik dengan  $B = 2.0T$  yang bekerja secara tegak lurus pada bidang lintasan. Hitunglah perubahan momen magnetiknya !.

**Pembahasan:**

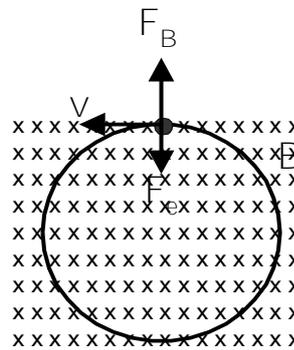
Besarnya momen magnetik  $\mu$  (ambil untuk  $N = 1$ ) :

$$\mu = NiA = (1)(e\nu)(\pi r^2) = \left(\frac{e\omega}{2\pi}\right)(\pi r^2) = \frac{1}{2}er^2\omega$$

perubahan momen magnetik  $\Delta\mu$  :

$$\Delta\mu = \frac{1}{2}er^2\Delta\omega$$

untuk mencari besaran  $\Delta\omega$ , tinjau gambar di bawah ini :



besarnya gaya yang bekerja pada elektron dalam medan magnetik:

$$F_e = -e(vxB)$$

besarnya gaya magnetik yangbekerja selalu tegak lurus dalam arah gerakan :

$$F_B = evB = e\omega_o rB$$

gaya resultan yang timbul pada elektron yang bersirkulasi dalam medan magnetik :

$$F_e \pm F_B = m\omega^2 r$$

$$m\omega_o^2 \pm e\omega rB = m\omega^2 r \quad *)$$

$$\omega_o^2 \pm \left(\frac{eB}{m}\right)\omega r - \omega^2 r = 0$$

dari kenyataan bahwa  $\omega$  hanya berbeda sedikit dari  $\omega_o$ , sehingga:

$$\omega = \omega_o + \Delta\omega$$

dalam hal ini,  $\Delta\omega \ll \omega_o$ , sehingga persamaan \*) menjadi :

$$\left(\omega_o^2 + 2\omega_o\Delta\omega - (\Delta\omega)^2\right) \mp (\beta\omega_o + \beta\Delta\omega) - \omega_o^2 = 0$$

dimana suku-suku  $(\Delta\omega)^2$  dan  $\beta\Delta\omega$  sangat kecil dibandingkan suku-suku lain, maka :

$$\Delta\omega \equiv \mp \frac{1}{2}\beta = \pm \frac{eB}{2m}$$

sehingga perubahan momen magnetik  $\Delta\mu$  :

$$\begin{aligned}\Delta\mu &= \pm \frac{1}{2} er^2 \left( \frac{eB}{2m} \right) = \pm \frac{e^2 Br^2}{4m} \\ &= \pm \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 (2.0)(5.3 \times 10^{-11})^2}{(4)(9.1 \times 10^{-31})} = \pm 4.0 \times 10^{-29} \text{ A.m}^2\end{aligned}$$

- 4) Tinjau gas elektron konduksi pada suhu nol mutlak dalam medan magnetik lemah  $B$ . Jika konsentrasi spin up  $N_+$  dan spin down  $N_-$  elektron dapat diparameterisasi oleh kuantitas  $x$ , maka :

$$N_+ = \frac{1}{2} N(1+x), \quad N_- = \frac{1}{2} N(1-x)$$

dimana  $N$  jumlah total elektron. Buktikanlah bahwa susceptibilitas magnetik  $\chi = M/B$  dapat dinyatakan sebagai :

$$\chi = \frac{3n\mu_B^2}{2E_F}$$

### Pembahasan:

Energi elektron konduksi dinyatakan sebagai :

$$\epsilon = \frac{p^2}{2m} \pm \mu B$$

dimana  $\epsilon = \frac{p^2}{2m}$  energi kinetik elektron,  $\mu$  momen magnetik, sedangkan tanda (+) dan (-) mencirikan spin paralel dan anti paralel terhadap  $B$ .

Rapat keadaan elektron konduksi dinyatakan sebagai :

$$\rho(E) = C\sqrt{E}dE$$

dimana  $C$  adalah konstanta dan kerapatan elektron dengan momen magnetik paralel dan anti paralel terhadap  $B$  dinyatakan :

$$N_+ = C \int_0^{E_+} \rho(E)dE, \quad N_- = C \int_0^{E_-} \rho(E)dE$$

pada suhu nol mutlak, semua keadaan di bawah energi tertentu  $\epsilon_o$  terisi elektron dalam arah kedua spin :

$$\epsilon_o = E_+ - \mu B = E_- + \mu B$$

dimana :

$$E_+ = \epsilon_o + \mu B$$

$$E_- = \epsilon_o - \mu B$$

sehingga :

$$N_+ \equiv \frac{1}{2} N(1+x) = C \int_0^{\epsilon_o + \mu B} E^{1/2} dE = \frac{2}{3} C(\epsilon_o + \mu B)^{3/2}$$

$$N_- \equiv \frac{1}{2} N(1-x) = C \int_0^{\epsilon_o - \mu B} E^{1/2} dE = \frac{2}{3} C(\epsilon_o - \mu B)^{3/2}$$

andaikan  $E_F$  adalah energi Fermi dengan ketidakhadiran medan magnetik, maka akan didapatkan :

$$N = 2C \int_0^{E_F} E^{1/2} dE = \frac{4}{3} C E_F^{3/2}$$

yang memberikan  $C = \frac{3}{4} N E_F^{-3/2}$ , sehingga :

$$\epsilon_o + \mu B = E_F (1+x)^{2/3}$$

$$\epsilon_o - \mu B = E_F (1-x)^{2/3}$$

untuk  $x \ll 1$ , diperoleh :

$$x \approx \frac{3\mu B}{2E_F}$$

Energi total elektron dengan spin up dan spin down :

$$\begin{aligned} E_{+total} &= C \int_0^{\epsilon_o + \mu B} (E - \mu B) E^{1/2} dE \\ &= \frac{2}{5} C(\epsilon_o + \mu B)^{5/2} - \mu B N_+ \\ &= \frac{2}{5} C E_F^{2/5} (1+x)^{5/3} - \frac{1}{2} \mu B N(1+x) \\ &= \frac{3}{10} E_F N(1+x)^{5/3} - \frac{1}{2} \mu B N(1+x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{-total} &= C \int_0^{\epsilon_o - \mu B} (E + \mu B) E^{1/2} dE \\ &= \frac{2}{5} C(\epsilon_o - \mu B)^{5/2} + \mu B N_- \\ &= \frac{3}{10} E_F N(1-x)^{5/3} + \frac{1}{2} \mu B N(1-x) \end{aligned}$$

sehingga energi total dari gas elektron konduksi :

$$\begin{aligned} E_{total} &= \frac{3}{10} N E_F \left[ (1+x)^{5/3} + (1-x)^{5/3} \right] - \mu B N x \\ &\cong \frac{3}{5} N E_F - \mu B N x \\ &\approx \frac{3}{5} N E_F - \frac{2\mu^2 B^2}{2E_F} N \end{aligned}$$

untuk medan lemah dijustifikasi dengan mengambil  $\mu B \ll E_F$  atau  $x \ll 1$ . Pada saat momen magnetik meningkat dari spin elektron  $\mu = \mu_B$  (magneton Bohr), maka momen magnetik totalnya menjadi  $VM$ , dimana  $M$  magnetisasi dan  $V$  volume gas elektron. Selanjutnya :

$$VM = (N_+ - N_-)\mu_B = Nx\mu_B$$

$$M = nx\mu_B = \frac{3n\mu_B^2 B}{2E_F}$$

suseptibilitas magnetik  $\chi$  :

$$\chi = \frac{M}{B} = \frac{3n\mu_B^2 B}{2E_F B}$$

- 5) Apa yang dimaksud dengan harga jenuh spesifik untuk kerapatan magnetisasi dari besi/baja (satuan keadaan)?. Dari harga ini dan harga spesifik lainnya, perkirakan momen magnetik spin intrinsik elektron untuk keadaan feromagnetisme !.

**Pembahasan:**

Pada pemakaian medan magnetik, magnetisasi besi akan meningkat dengan intensitas medan, jika medan meningkat pada harga tertentu magnetisasi tidak akan meningkat lagi selanjutnya, tapi mencapai harga jenuh pada harga  $M_s$  pada waktu tertentu. Berdasarkan teori feromagnetisme, semua momen magnetik akibat spin elektron akan disejajarkan sepanjang arah medan magnetik. Misalkan jumlah kerapatan elektron dalam bahan feromagnetik adalah  $n$  dan momen magnetik akibat spin elektron adalah  $\mu$ , maka :

$$M_s = n\mu$$

magnetisasi jenuh spesifik dari besi,  $M_s = 10^6 \text{ Am}^{-1}$  dan  $n = 3 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ , serta momen magnetik spin intrinsik elektron adalah :

$$\mu = \frac{M_s}{n} \cong \frac{10^6}{3 \times 10^{28}} = 3 \times 10^{-23} \text{ Am}^2$$

**11. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik Soal:**

- 1) Buktikan bahwa konstanta dielektrik sebagai fungsi  $\omega$  untuk elektron bebas gas dengan kerapatan  $n$  dinyatakan sebagai :

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

dengan :  $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$

Jika volume sel satuan primitif logam Na  $35 \times 10^{-30} \text{ m}^3$ , hitunglah panjang gelombang pancung (cuttof) logam Na tersebut!.

**Pembahasan:**

Jika diberikan medan listrik yang sejajar arah sumbu x :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t}$$

perpindahan elektron dari posisi netralnya diberikan sebagai :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + eE_0 e^{i\omega t} = 0$$

ambil bahwa solusi yang memenuhi persamaan diferensial diatas :

$$x = x_0 e^{i\omega t}$$

dengan  $x_0 = \frac{eE_0}{m\omega^2}$

Momen dipol per satuan volume atau pengutuban dari elektron gas :

$$\begin{aligned} P &= nex = -\frac{ne^2}{m\omega^2} E_0 e^{i\omega t} \\ &= -\frac{ne^2}{m\omega^2} E \end{aligned}$$

konstanta dielektrik relatif  $\epsilon$  dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{D}{\epsilon_0 E} = \frac{\epsilon_0 E + P}{\epsilon_0 E} = 1 - \frac{ne^2}{\epsilon_0 m \omega^2} \\ \epsilon &= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \end{aligned}$$

dengan  $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}}$  frekuensi angular plasma.

Atom Na mempunyai valensi satu dan setiap atom menyumbang satu elektron konduksi, dalam tiap sel satuan primitif mengandung satu atom, sehingga kerapatan elektron konduksi :

$$n = \frac{1}{35 \times 10^{-30}} = 2.86 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

dengan menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} \omega_p^2 &= \frac{ne^2}{\epsilon_0 m} = 4\pi c^2 \left( \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 m c^2} \right) \\ \omega_p^2 &= 4\pi (3 \times 10^8)^2 (2.86 \times 10^{28}) (2.82 \times 10^{-15}) \\ &= 9.12 \times 10^{31} \text{ s}^{-2} \end{aligned}$$

frekuensi angular pancung (cuttof) :

$$\omega = \omega_p = 9.55 \times 10^{15}$$

sehingga panjang gelombang cuttof menjadi :

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ m} = 2000 \text{ \AA}$$

- 2) Tentukan persentasi polarisabilitas ionik dari kristal NaCl dengan indeks bias optik dan konstanta dielektrik masing-masing 1.5 dan 5.6!

**Pembahasan:**

Gunakan persamaan Clausius-Mossotti:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N(\alpha_e + \alpha_i)}{3\epsilon_0}$$

Dimana  $\alpha_e$  dan  $\alpha_i$  menyatakan kontribusi elektronik dan ionik pada polarisabilitas.

Pada frekuensi optik berlaku:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{N\alpha_e}{3\epsilon_0}$$

dengan  $n$  menyatakan indeks bias. Selanjutnya:

$$\left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right) \left(\frac{\epsilon_r + 2}{\epsilon_r - 1}\right) = \frac{\alpha_e}{\alpha_e + \alpha_i}$$

dimana persamaan sebelah kanan menyatakan fraksi polarisabilitas elektronik. Sehingga prosentasi polarisabilitas elektronik dapat ditulis menjadi:

$$\left(\frac{\alpha_i}{\alpha_e + \alpha_i}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{\alpha_e}{\alpha_e + \alpha_i}\right) \times 100\%$$

$$\left(\frac{\alpha_i}{\alpha_e + \alpha_i}\right) \times 100\% = \left[1 - \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right) \left(\frac{\epsilon_r + 2}{\epsilon_r - 1}\right)\right] \times 100\%$$

$$\left(\frac{\alpha_i}{\alpha_e + \alpha_i}\right) \times 100\% = \left[1 - \left(\frac{1.5^2 - 1}{1.5^2 + 2}\right) \left(\frac{5.6 + 2}{5.6 - 1}\right)\right] \times 100\% = 51.4\%$$

- 3) Asumsikan bahwa terdapat sekitar  $10^{27}$  molekul HCl/m<sup>3</sup>, maka tentukan orientasi polarisasi pada temperatur ruang jika HCl ini berada di bawah pengaruh medan listrik sebesar  $10^6$  V/m. Momen dipol molekul HCl sekitar  $3.46 \times 10^{-30}$  C-m. Tunjukkan bahwa pada temperatur dan medan tinggi ini, nilai  $a$  ( $=pE/kT$ ) sangat kecil.

**Pembahasan:**

Diberikan  $N = 10^{27}$  molekul HCl/m<sup>3</sup>,  $E = 10^6$  V/m,  $p = 3.46 \times 10^{-30}$  C-m. Orientasi polarisabilitas (dipolar) diberikan oleh persamaan:

$$\alpha_d = \frac{p^2}{3kT} = \frac{(3.46 \times 10^{-30})^2}{(3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300)} = 9.64 \times 10^{-40} \text{ Fm}^2$$

Sehingga orientasi polarisasi menjadi:

$$P = np = N\alpha_d E = 10^{27} \times (9.64 \times 10^{-40}) \times 10^6 = 9.64 \times 10^{-7} \text{ Cm}^2$$

Energi magnetik:

$$\text{Energi magnetik} = pE = 3.46 \times 10^{-30} \times 10^6 = 3.46 \times 10^{-24} \text{ J}$$

Energi termal:

$$\text{Energi termal} = kT = 1.38 \times 10^{-23} \times 300 = 4.04 \times 10^{-21} \text{ J}$$

Maka bandingkan kedua energi ini untuk mendapatkan nilai  $a$ :

$$a = \frac{.46 \times 10^{-24}}{4.04 \times 10^{-21}} = 10^{-3}$$

4) Jelaskan fenomena polarisasi alamiah dari bahan ferroelektrik!

**Pembahasan:**

Bahan ferroelektrik adalah bahan yang menunjukkan suatu polarisasi permanen tanpa adanya medan listrik eksternal, sifat ini menunjukkan kecenderungan alamiah dari kutub-kutub permanen molekul-molekulnya untuk saling mensejajarkan diri yang mungkin dihasilkan oleh interaksi antar molekul yang akan menimbulkan medan lokal yang kuat yang membantu kesejajarannya. Besarnya polarisasi jika medan eksternal tidak ada, dinyatakan sebagai :

$$E_m = \frac{1}{3\epsilon_o} P_o$$

dalam hal ini jika terjadi polarisasi  $P_o$ , maka akan timbul medan listrik pada molekul  $E_m$  dengan kecenderungan mengutubkan molekul tersebut. Jika terdapat  $N$  molekul per satuan volume, maka :

$$P_o = N\alpha E_m = \frac{N\alpha}{3\epsilon_o} = 1$$

bahan yang memenuhi persamaan diatas dikatakan sebagai bahan ferroelektrik, contoh bahan yang memiliki sifat ini diantaranya :

- Kelompok Garam-garam Rochelle:  $\text{NaK}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  
 $\text{LiNH}_4((\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O})$
- Kelompok KDP (Potassium Dihydrogen Phosphate):  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  
 $\text{KD}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{RbH}_2\text{PO}_4$
- Kelompok Perovskites:  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{WO}_3$

5) Buktikan bahwa konstanta dielektrik sebagai fungsi  $\omega$  untuk elektron bebas gas dengan kerapatan  $n$  dinyatakan sebagai :

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

dengan :  $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_o m}$

Jika volume sel satuan primitif logam Na  $35 \times 10^{-30} \text{ m}^3$ , hitunglah panjang gelombang pancung (cuttof) logam Na tersebut !.

**Pembahasan:**

Jika diberikan medan listrik yang sejajar arah sumbu x :

$$\vec{E} = \vec{E}_o e^{i\omega t}$$

perpindahan elektron dari posisi netralnya diberikan sebagai :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + eE_o e^{i\omega t} = 0$$

ambil bahwa solusi yang memenuhi persamaan diferensial diatas :

$$x = x_o e^{i\omega t}$$

dengan  $x_o = \frac{eE_o}{m\omega^2}$

Momen dipol per satuan volume atau pengutuban dari elektron gas :

$$P = nex = -\frac{ne^2}{m\omega^2} E_o e^{i\omega t}$$

$$= -\frac{ne^2}{m\omega^2} E$$

konstanta dielektrik relatif  $\epsilon$  dinyatakan dengan :

$$\epsilon = \frac{D}{\epsilon_o E} = \frac{\epsilon_o E + P}{\epsilon_o E} = 1 - \frac{ne^2}{\epsilon_o m \omega^2}$$

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

dengan  $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_o m}}$  frekuensi angular plasma.

Atom Na mempunyai valensi satu dan setiap atom menyumbang satu elektron konduksi, dalam tiap sel satuan primitif mengandung satu atom, sehingga kerapatan elektron konduksi :

$$n = \frac{1}{35 \times 10^{-30}} = 2.86 \times 10^{28} m^3$$

dengan menggunakan persamaan :

$$\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_o m} = 4\pi c^2 \left( \frac{e^2}{4\pi \epsilon_o m c^2} \right)$$

$$\omega_p^2 = 4\pi (3 \times 10^8)^2 (2.86 \times 10^{28}) (2.82 \times 10^{-15})$$

$$= 9.12 \times 10^{31} s^{-2}$$

frekuensi angular pancung (cuttof) :

$$\omega = \omega_p = 9.55 \times 10^{15}$$

sehingga panjang gelombang cutoff menjadi :

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = 2.0 \times 10^{-7} m = 2000 \text{ \AA}$$

## 12. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu mengklasifikasikan tentang konsep superkonduktivitas

**Soal:**

- 1) Jelaskan perbedaan antara Superkonduktor tipe I dan superkonduktor tipe II.

**Pembahasan:**

| Superkonduktor tipe I              | Superkonduktor tipe II               |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Disebut <i>Soft</i> Superkonduktor | Disebut <i>hard</i> superkonduktor   |
| Prinsip kerja berdasarkan efek     | Prinsip kerja tidak berdasarkan efek |

| Meissner  | Meissner  |
|---|---|
| Di bawah medan kritis $H_c$ bersifat sebagai bahan diamagnetisme. Pada saat medan magnetik meningkat melebihi medan kritis $H_c$ medan menembus bahan secara komplit dan selanjutnya specimen berubah ke keadaan normalnya. | Menunjukkan sifat diamagnetisme di atas medan kritis $H_{c1}$ yang disebut medan magnetik terendah. Di antara $H_{c1}$ dan $H_{c2}$ specimen berada dalam keadaan campuran. Dimana di atas $H_{c2}$ specimen adalah konduktor normal. |
| Terjadi lompatan tiba-tiba ke keadaan normal ketika medan magnet meningkat melebihi $H_c$   | Tidak terjadi lompatan tiba-tiba ketika medan magnetik meningkat  |
| Nilai $H_c$ sangat kecil sehingga aplikasinya sangat terbatas   | Diperlukan medan magnetik yang relatif tinggi untuk mengubah sifat superkonduktornya  |

- 2) Hitung kerapatan elektron superkonduktif Merkuri pada 3.5 K, jika diberikan temperatur transisi Merkuri 4.22 K.

**Pembahasan:**

Rapat arus normal Merkuri dihitung berdasarkan berat molekul dan kerapatannya:

$$n_0 = \frac{N\rho}{M} = \frac{(6.023 \times 10^{23})(13.55 \times 10^3)}{200.6} = 4.06 \times 10^{28} /m^3$$

$$n_s = n_0 \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^4 \right) = (4.06 \times 10^{28}) \left( 1 - \left( \frac{3.5}{4.22} \right)^4 \right) = 2.138 \times 10^{28} /m^3$$

- 3) Kedalaman penetrasi London untuk suatu sampel pada 6 K dan 7 K adalah 41.2 nm dan 183.0 nm. Hitung temperatur transisi selama kedalaman penetrasi pada 0 K.

**Pembahasan:**

Diketahui  $T_1 = 6$  K,  $T_2 = 7$  K,  $\lambda(T_1) = 41.2$  nm, dan  $\lambda(T_2) = 183.0$  nm.

Diketahui bahwa:

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^4}}$$

Maka:

$$\frac{\lambda(T_1)}{\lambda(T_2)} = \frac{\sqrt{1 - \left( \frac{T_1}{T_c} \right)^4}}{\sqrt{1 - \left( \frac{T_2}{T_c} \right)^4}} = \sqrt{\frac{T_c^4 - T_2^4}{T_c^4 - T_1^4}}$$

atau

$$\left(\frac{\lambda(0)}{\lambda(6)}\right)^2 = \left(\frac{T_c^4 - T_2^4}{T_c^4 - T_1^4}\right) = \left(\frac{41.2}{183.0}\right)^2 = \left(\frac{T_c^4 - 6^4}{T_c^4 - 7^4}\right)$$

$$T_c^4 = \frac{44683.15}{18.15} = 2461.88$$

$$T_c = 7.04 \text{ K}$$

Temperatur transisi:

$$\lambda(6) = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{6}{T_c}\right)^4}}$$

$$\lambda(0) = \lambda(6) \sqrt{1 - \left(\frac{6}{7.04}\right)^4} = 28.34 \text{ mmm}$$

- 4) Diketahui temperatur kritis  $T_C$  untuk Hg dengan massa isotop 199.5 adalah 4.185 K. Hitung temperatur kritisnya pada saat massa isotop berubah menjadi 203.4.

**Pembahasan:**

Diberikan  $T_{C1} = 4.185 \text{ K}$ ,  $M_1 = 199.5$ ,  $M_2 = 203.4$ , maka  $T_{C2}$ ?

Diketahui bahwa:

$$T_C \sqrt{M} = \text{Konstan}$$

$$\frac{T_{C1}}{T_{C2}} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \Rightarrow \frac{4.185}{T_{C2}} = \sqrt{\frac{203.4}{199.5}}$$

$$T_{C2} = 4.185 \times \sqrt{\frac{199.5}{203.4}} = 4.14 \text{ K}$$

- 5) Hitung rapat arus kritis untuk kawat dengan diameter 1 mm pada 4.2 K. Asumsikan bahwa intensitas medan magnetik kritis bergantung pada temperatur ( $T$ ). Diberikan  $T_C$  untuk timah 7.18 K dan  $H_C(0)$  adalah  $6.5 \times 10^4 \text{ A/m}$ .

**Pembahasan:**

Diberikan  $T = 4.2 \text{ K}$ ,  $T_C = 7.18 \text{ K}$ ,  $H_C(0) = 6.5 \times 10^4 \text{ A/m}$ ,  $d = 1 \text{ mm}$  ( $r = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ ), maka:

$$H_C(T) = H_C(0) \left(1 - \frac{T^2}{T_C^2}\right) = 6.5 \times 10^4 \left(1 - \frac{4.2}{7.18}\right) = 4.28 \times 10^4 \text{ A/m}$$

Arus kritis ( $I_C$ ):

$$I_C = 2\pi r H_C$$

Rapat arus kritis ( $J_C$ ):

$$J_C = \frac{I_C}{A} = \frac{2\pi r H_C}{\pi r^2} = \frac{2 \times 4.28 \times 10^4}{5 \times 10^{-4}} = 1.71 \times 10^8 \text{ A/mm}^2$$

### 13. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami konsep Nano-Material

#### Soal:

- 1) Gambarkan secara singkat dan jelas tentang struktur dan sifat-sifat partikel-nano.

#### Pembahasan:

Partikel-nano terbentuk dari kumpulan atom atau molekul dengan jumlah  $10^6$  atau kurang yang terikat bersama dalam satu kluster dengan jari-jari sekitar 100 nm atau kurang. Beberapa struktur yang dikategorikan dalam partikel-nano, diantaranya metal nano-kluster, semikonduktor nano-kluster, dan dielektrik nano-partikel.

Sifat material berubah ketika ukuran mereka mendekati skala nano dan ketika persentase dari permukaan dalam hubungannya dengan persentase volume material menjadi signifikan. Untuk material ruah yang lebih besar dari satu mikrometer (atau mikron), persentase permukaan tidak signifikan dalam kaitannya dengan volume dalam sebagian besar materi.

Oleh karena itu sifat yang menarik dan kadang-kadang tak terduga dari nanopartikel adalah sebagian besar disebabkan oleh luas permukaan yang besar pada material, yang mendominasi kontribusi yang diberikan oleh sebagian kecil dari materi

- 2) Jelaskan struktur dan sifat karbon nano-tube (CNT)

#### Pembahasan:

Karbon nano-tube (CNT) adalah material yang terbentuk dari ikatan antar atom karbon, dimana satu atom karbon berikatan dengan tiga atom karbon lainnya. CNT merupakan jenis struktur supramolekul (molekul sangat besar) yang disebut sebagai allotrop. Beberapa struktur lain yang dibentuk oleh karbon, yaitu graphene, grafit, intan dan fullerene. Beberapa sifat CNT, diantaranya:

1. Sifat listrik: CNT terdiri dari kombinasi N dan M (perkiraan struktur parameter berapa banyak nano-tube yang menggulung), dimana sifat konduktifnya bergantung pada derajat penggulangan, dimana derajat penggulangan ini menentukan sifatnya sebagai logam, semikonduktor, dan isolator.
2. Sifat mekanik: CNT memiliki massa jenis yang kecil, yaitu antara 1.3-1.4 g/cm<sup>3</sup>, dengan ikatan kimia dominan sp<sup>2</sup> mirip dengan graphene. Oleh karena ikatannya sangat kuat, CNT memiliki modulus elastis yang sangat besar dibandingkan material lainnya, sehingga diharapkan dapat menjadi bahan fiber yang sangat kuat.
3. Sifat termal: CNT merupakan konduktor panas yang baik dibandingkan material lain. Sifat konduktivitasnya disebabkan fenomena konduksi balistik sepanjang tabung. CNT stabil pada suhu lebih besar dari 2800 °C di dalam vakum dan 750 °C di udara.

4. Sifat Optik: Sifat optik CNT akan berkurang dengan bertambahnya ukuran CNT, diantaranya lebar celah pita energi (band-gap) dipengaruhi oleh diameternya, dimana makin kecil diameternya, maka celah pita energinya makin besar.
  5. Sifat kimia: Sifat reaktivitas kimia dari CNT menyerupai lembaran graphene yang berpengaruh pada pembentukan (penggulungan) CNT. Makin kecil diameter CNT, maka sifat reaktifnya makin besar dan luas permukaan spesifiknya makin besar.
  6. Pengaruh cacat terhadap sifat CNT: Cacat dimaksud berupa kekosongan atom (vacancy) dapat mempengaruhi sifat suatu material. Nilai cacat yang tinggi dapat menurunkan daya regang CNT sampai 85%. Cacat juga secara keseluruhan mempengaruhi sifat listrik (penurunan konduktivitas), menyebabkan perubahan menjadi bahan semikonduktor, serta mempengaruhi sifat termal CNT dalam bentuk pengurangan konduktivitas termalnya
- 3) Jelaskan bagaimana Kuantum Dot (Quantum Dot) dihasilkan berdasarkan struktur, sifat-sifat karakteristik, dan aplikasinya.

**Pembahasan:**

Kuantum dot (QD) disebut juga dengan atom tambahan (artificial atom), hal ini disebabkan karena QD memiliki ukuran beberapa kali ukuran atom tunggal yang menyerupai sifat sebuah atom, yaitu didasarkan pada beberapa fenomena kuantum, seperti efek terobosan, rapat keadaan, dan tingkat-tingkat energi. QD merupakan material yang menyerap dan memancarkan cahaya secara efisien dan spesifik bergantung pada ukurannya, sehingga mempunyai peluang besar dalam aplikasi bidang optoelektronik (laser dan LED). Beberapa aplikasi dari QD yang sedang dan sudah dikembangkan, diantaranya:

1. Transistor elektron tunggal: merupakan salah satu kandidat untuk devais non-volatile memory dan gerbang logika.
  2. Sel surya: devais ini mampu mengubah sinar matahari menjadi energi listrik secara langsung. Untuk sel surya berbasis Si terdapat kendala dalam pemanfaatannya akibat efisiensi konversi yang dihasilkannya relatif rendah, sehingga pemanfaatan QD dengan ukuran dalam skala nanometer akan menghasilkan luas permukaan serapan yang besar.
  3. Piranti memori: pemanfaatan QD untuk piranti memori berkecepatan tinggi memiliki peluang pengembangan yang sangat besar, hal ini dikarenakan kapasitas dan waktu simpan yang lama
- 4) Jelaskan prinsip kerja Atomic Force Microscopy (AFM)

**Pembahasan:**

AFM merupakan mikroskop canggih dengan teknik pengoperasian yang sederhana. Kelebihan AFM dibandingkan peralatan karakterisasi lainnya, yaitu tidak memerlukan vakum, tegangan tinggi maupun fasilitas

pendingin, seperti halnya SEM dan TEM. Prinsip kerja AFM didasarkan pada cantilever beserta tip digerakan sepanjang permukaan benda yang diamati, dimana tekstur permukaan benda yang tidak rata, maka selama menggerakkan tip, sudut kemiringan cantilever berubah-ubah. Perubahan ini memberikan informasi kedalaman tekstur permukaan benda. Sudut yang dibentuk oleh cantilever ditentukan dengan mengarahkan berkas tipis sinar laser kearah cantilever. Perubahan sudut cantilever menyebabkan arah sinar pantul sehingga kedalaman tekstur benda dapat diketahui.

## 2.10 PEDOMAN PENSKORAN SOAL URAIAN

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Perguruan Tinggi      | : Universitas Mulawarman   |
| Fakultas              | : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam                    |
| Program Studi         | : Fisika   |
| Mata Kuliah           | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah      | : 190704603W034  |
| Semester/sks          | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Mata Kuliah Prasyarat | : Fisika Kuantum, Fisika Modern, Listrik Magnet                    |
| Nama Dosen            | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si |

### 1. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat

#### Nomor 1:

Dalam sistem kristal sederhana ortorombik, dua titik kisi terhubung satu sama lain dengan vektor translasi  $T = 2a + 3b + 4c$ , dimana  $a = 2\text{\AA}$ ,  $b = 3\text{\AA}$  dan  $c = 4\text{\AA}$ . Tentukan nilai dan arah vektor translasi!

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | Diberikan $a = 2\text{\AA}$ , $b = 3\text{\AA}$ , $c = 4\text{\AA}$ , $n_1 = 2$ , $n_2 = 3$ , dan $n_3 = 4$ , kita ketahui bahwa untuk kasus ortorombik $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ dan $\cos 90^\circ = 0$                                 | 0 - 10         |
| 2                  | sehingga panjang resultan vektor antara kedua titik kisi tersebut bisa dinyatakan sebagai:<br>$R = \sqrt{(n_1 a)^2 + (n_2 b)^2 + (n_3 c)^2}$ $= \sqrt{(2 \times 2)^2 + (3 \times 3)^2 + (4 \times 4)^2}$ $= \sqrt{16 + 81 + 256} = 18.79 \text{\AA}$ | 0 - 80         |
| 3                  | Arah vektor translasi adalah [234]   | 0 - 10         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Nomor 2:**

Elemen kristal dengan struktur FCC dengan parameter sel satuan sebesar  $2\text{\AA}$ . Hitung kerapatannya jika  $0.2\text{ kg}$  unsur tersebut mengandung  $24 \times 10^{24}$  atom.

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | Diberikan untuk struktur FCC dengan $n = 4$ ,<br>$a = 2\text{\AA} = 2 \times 10^{-10}\text{ m}$ , $m = 0.2\text{ kg}$ , jumlah atom dalam<br>$0.2\text{ kg} = 24 \times 10^{24}$ atom, maka nilai $\rho = ?$   | 0 - 10         |
| 2                  | Kita ketahui bahwa jumlah total atom adalah:<br>Jumlah total atom = (Atom/sel satuan) x jumlah sel satuan<br>Jumlah sel satuan = $\frac{\text{Jumlah total atom}}{\frac{\text{atom}}{\text{sel}} \text{satuan}} = \frac{24 \times 10^{24}}{4}$<br>Jumlah sel satuan = $6 \times 10^{23}$ | 0 - 30         |
| 3                  | Selanjutnya, volume substansi menjadi:<br>$Vol = \text{Jumlah sel satuan} \times Vol. \text{ sel satuan}$<br>$Vol = 6 \times 10^{23} (2 \times 10^{-10})^2 = 48 \times 10^{-7} \text{ m}^3$  | 0 - 30         |
| 4                  | Sehingga kerapatan kristal menjadi:<br>$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0.2}{48 \times 10^{-7}} = 4.17 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$  | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

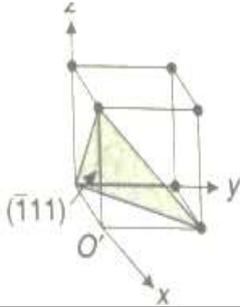
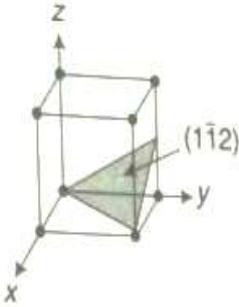
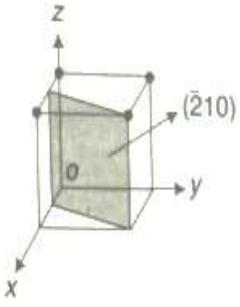
**Nomor 3:**

Tentukan indeks Miller pada bidang yang melalui perpotongan pada  $3a, 4b, 6c$  sepanjang sumbu kristalik, dimana  $a, b, c$  merupakan vektor translasi primitif dari kisi.

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | Tinjau prosedur di bawah ini:<br>(i) Perpotongan $3a$ $4b$ $6c$                               | 0 - 20         |
| 2                  | (ii) Pembagian oleh satuan translasi $\frac{3a}{a} = 3$ $\frac{4b}{b} = 4$ $\frac{6c}{c} = 3$ | 0 - 20         |
| 3                  | (iii) Resiprok $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{6}$                                      | 0 - 20         |
| 4                  | (iv) Setelah pembagian $4$ $3$ $2$  | 0 - 20         |
| 5                  | Indeks Miller bidang (432)  | 0 - 20         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**Nomor 4:**

Gambarkan bidang  $(\bar{1}11)$ ,  $(1\bar{1}2)$ ,  $(\bar{2}10)$

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | Buat struktur sel satuan kubik, selanjutnya pilih titik asal dan tiga sumbu kristalografik. Gambarnya ditunjukkan sebagai berikut: | 0 - 10         |
| 2                  |   | 0 - 30         |
| 3                  |    | 0 - 30         |
| 4                  |   | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Nomor 5:**

Jarak antara bidang  $(111)$  pada kristal FCC adalah  $2\text{\AA}$ . Tentukan parameter kisi dan diameter atomik.

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | Diberikan bidang Miller (111), maka kristal FCC ini:<br>$d_{111} = 2\text{\AA}$  | 0 - 25         |
| 2                  | Jarak interplanar antara bidang (111) pada kristal FCC:<br>$d_{111} = \frac{a}{\sqrt{3}} = 2\text{\AA} \rightarrow a = 2\sqrt{3}\text{\AA}$                  | 0 - 25         |
| 3                  | Dalam kristal FCC hubungan antara parameter kisi dan diameter atom diberikan oleh:<br>$\sqrt{2}a = 4R = 2D \rightarrow D = \frac{\sqrt{2}a}{2} = \sqrt{6} a$ | 0 - 50         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

## 2. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang konsep Ikatan kristal

### Soal ke 1:

Energi potensial molekul diatomik dalam bentuk jarak interatomik  $R$  diberikan oleh:

$$U(R) = -\frac{A}{R^m} + \frac{B}{R^n}$$

Dimana  $A, B, m, n$  menyatakan konstanta karakteristik dari molekul  $MX$

a. Turunkan pernyataan yang menyatakan jarak antar dalam keadaan setimbang

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Karena jarak setimbang $R_e$ (panjang ikatan), gaya tarik = gaya tolak, dimana gaya interaksi antara dua atom sebagai fungsi dari $R$ , sehingga:<br>$F = -\frac{dU}{dR} = -\frac{mA}{R^{m+1}} + \frac{nB}{R^{n+1}}$ | 0 - 10 |
| 2  | Selanjutnya, pada saat jarak setimbang ( $R = R_e$ )<br>$F = -\left(\frac{dU}{dR}\right)_{R=R_e} = 0$<br>$\frac{mA}{R_e^{m+1}} = \frac{nB}{R_e^{n+1}}$   | 0 - 10 |
| 3  | Selanjutnya:<br>$R_e = \left(\frac{nB}{mA}\right)^{1/n-m}$   | 0 - 10 |

|                    |  |               |
|--------------------|--|---------------|
|                    | Yang merupakan jarak seimbang yang diperlukan. |               |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 30</b> |

- b. Jelaskan pentingnya jarak setimbang sebagai konfigurasi dengan energi potensial terendah, selanjutnya dapatkan pernyataan untuk energi disosiasi atom.

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor          |
|--------------------|---|---------------|
| 1                  | Substitusi nilai $R_e$ , sehingga energi potensial diperoleh:<br>$U_e = U_{R=R_e} = -\frac{A}{R_e^m} \left(1 - \frac{m}{n}\right)$  | 0 - 10        |
| 2                  | Ketika gaya total nol, maka energi potensial minimum dan negatif, sementara kuantitas positif $D = -U_e$ disebut energi disosiasi molekul, yaitu energi untuk memisahkan dua atom | 0 - 10        |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 20</b> |

- c. Buktikan bahwa untuk  $n > m$  untuk  $U(R)$  menjadi minimum pada  $R = R_e$

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Sebagai catatan bahwa gaya tarik dan tolak adalah setimbang pada jarak setimbang, sementara energi tarik dan tolak tidak sama karena $m \neq n$ . Hal ini cukup jelas pada soal (b), nilai minimum pada kurva energi kemungkinan bisa dicapai pada saat $n > m$ . | 0 - 5  |
| 2  | Sebagai konsekuensinya, formasi ikatan kimia diperlukan ketika gaya tolak berada dalam jangkauan pendek dibandingkan gaya tarik. Hal ini dapat dari syarat:<br>$\left(\frac{d^2U}{dR^2}\right)_{R=R_e} > 0$   | 0 - 10 |
| 3  | Jika $U$ harus minimum pada $R_e$ , hal ini berkaitan dengan:<br>$-\frac{m(m+1)A}{R_e^{m+2}} + \frac{n(n+1)A}{R_e^{n+2}} > 0$ $n(n+1)BR_e^{m+2} - m(m+1)AR_e^{n+2} > 0$ $n(n+1)BR_e^{m+2} > m(m+1)AR_e^{n+2}$   | 0 - 35 |

|  |               |
|--|---------------|
| $n(n+1)B > m(m+1)AR_e^{n-m}$ $n(n+1)B > m(m+1)A \frac{nB}{mA}$ $n+1 > m+1 \rightarrow n > m$ |               |
| <b>Jumlah Skor</b>   | <b>0 - 50</b> |

**Soal ke 2:**

Tentukan energi potensial molekul CsCl pada kondisi setimbang, jika jarak pisah antara atom Cesium dan Chlorine adalah  $3.56 \text{ \AA}$ ,  $A = 1.76$  dan  $n = 11.5$ .

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | Diberikan $R_e = 3.56 \text{ \AA} = 3.56 \times 10^{-10} \text{ m}$ , $n = 11.5$ ,<br>$A = 1.76$ , maka $U_e$ menjadi:<br>$U_e = -\frac{Ae}{4\pi\epsilon_0 R_e} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \text{ (eV)}$ $U_e = -\frac{Ae^2}{4\pi\epsilon_0 R_e} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \text{ (Joule)}$ | 0 - 50         |
| 2                  | $U_e = -\frac{1.76 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 9 \times 10^9}{3.56 \times 10^{-10}} \times \frac{10.5}{11.5} = -6.50 \text{ (eV)}$   | 0 - 50         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

Tentukan jarak tetangga terdekat pada struktur BCC dan FCC, ketika radius atom diberikan  $10 \text{ \AA}$ .

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Diberikan radius atom $10 \text{ \AA}$ , misalkan radius untuk keduanya dinyatakan sebagai $d_{fcc}$ dan. Diketahui bahwa jarak tetangga terdekat dalam struktur BCC adalah setengahnya dari diagonal ruang $d_{bcc} = \frac{\sqrt{3}}{2} a$ , dimana $a$ menyatakan panjang sisi kubus. | 0 - 10 |
| 2  | Syarat batas untuk struktur BCC:<br>$\sqrt{3}a = 4R \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} a = 2R = 2 \times 10 \text{ \AA} = 20 \text{ \AA}$  | 0 - 30 |
| 3  | Sama halnya dengan jarak tetangga terdekat untuk struktur FCC setengah dari diagonal muka:<br>$d_{fcc} = \frac{\sqrt{2}}{2} a = \frac{a}{\sqrt{2}}$  | 0 - 30 |

|                    |   |                |
|--------------------|---|----------------|
| 4                  | Syarat batas untuk struktur FCC:<br>$\sqrt{2}a = 4R \rightarrow \frac{\sqrt{2}}{2} a = 2R = 2 \times 10 \text{ \AA} = 20 \text{ \AA}$ | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**3. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu menginterpretasikan tentang konsep kisi resiprok dan penentuan striuktur kristal**

**Soal ke 1:**

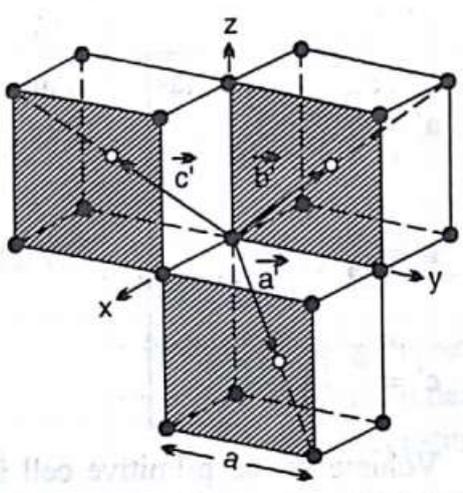
Tunjukkan bahwa volume sel satuan primitif dari struktur BCC diberikan oleh  $a^3/2$ , jika diketahui vektor translasi primitif dari kisi BCC diberikan oleh:

$$a' = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k})$$

$$b' = \frac{a}{2}(-\hat{i} + \hat{j} + \hat{k})$$

$$c' = \frac{a}{2}(\hat{i} - \hat{j} + \hat{k})$$

Dengan  $a$  menyatakan panjang sisi kubus,  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  menyatakan vektor satuan orthogonal sepanjang sisi-sisi kubus. Selanjutnya tentukan pula vektor kisi resiproknya.

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Tinjau gambar di bawah ini:<br>   | 0 - 10 |
| 2  | Vektor translasi primitif struktur BCC<br>$a' = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k})$ $b' = \frac{a}{2}(-\hat{i} + \hat{j} + \hat{k})$ $c' = \frac{a}{2}(\hat{i} - \hat{j} + \hat{k})$ | 0 - 15 |
| 3  | Volume sel primitif dinyatakan dengan persamaan:   | 0 - 25 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $V = a' \cdot b' \times c' = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k}) \cdot \left[ \frac{a^2}{4}(-\hat{i} + \hat{j} + \hat{k}) \times (\hat{i} - \hat{j} + \hat{k}) \right]$ $V = \frac{a}{2}(\hat{i} + \hat{j} - \hat{k}) \cdot \frac{a^2}{2}(\hat{i} + \hat{j}) = \frac{a^3}{2}$   |                |
| 4                  | Vektor kisi resiprok dinyatakan sebagai:<br>$a^* = 2\pi \frac{b' \times c'}{a' \cdot b' \times c'} = \frac{2\pi(a^2/2)}{a^3/2}(\hat{i} + \hat{j}) = \frac{2\pi}{a}(\hat{i} + \hat{j})$ $b^* = 2\pi \frac{c' \times a'}{a' \cdot b' \times c'} = \frac{2\pi}{a}(\hat{j} + \hat{k})$ $c^* = 2\pi \frac{a' \times b'}{a' \cdot b' \times c'} = \frac{2\pi}{a}(\hat{k} + \hat{i})$ | 0 - 50         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 2:**

Suatu berkas sinar-x dengan panjang gelombang 0.71 Å didifraksikan oleh kristal kubik KCl dengan kerapatan 1.99 x 10<sup>3</sup> kgm<sup>-3</sup>. Hitung jarak interplanar untuk bidang (200) dan sudut *glancing* untuk pantulan orde kedua dari bidang ini. Jika berat molekuler dari KCl adalah 74.6 amu dan bilangan Avogadro 6.023 x 10<sup>26</sup> kg<sup>-1</sup>mole<sup>-1</sup>.

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Untuk kristal kubik diketahui bahwa:<br>$a^3 = \frac{n'M}{N\rho}$ Dimana $a$ menyatakan konstanta kisi, $n'$ menyatakan jumlah molekul dalam sel satuan, $M$ menyatakan berat molekuler, $N$ menyatakan bilangan Avogadro dan $\rho$ menyatakan kerapatan. | 0 - 10 |
| 2  | Molekul KCl memiliki struktur mirip dengan NaCl, sehingga $n' = 4$ :<br>$a^3 = \frac{4 \times 74.6}{6.023 \times 10^{26} \times 1.99 \times 10^3} = 0.249 \times 10^{-27}$ $a = 6.29 \times 10^{-10} \text{ m}$  | 0 - 30 |
| 3  | Jarak interplanar bidang (200):<br>$d_{200} = \frac{a}{(4 + 0 + 0)^{1/2}} = \frac{6.29 \times 10^{-10}}{2} = 3.145 \text{ \AA}$  | 0 - 30 |
| 4  | Dengan menggunakan Hukum Bragg:<br>$2d \sin \theta = n\lambda$ Untuk refleksi orde kedua $n = 2$<br>$d \sin \theta = \lambda/d = 0.71/3.145 = 0.461$   | 0 - 30 |

|                    |                         |                |
|--------------------|-------------------------|----------------|
|                    | $\theta = 27.5^{\circ}$ |                |
| <b>Jumlah Skor</b> |                         | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

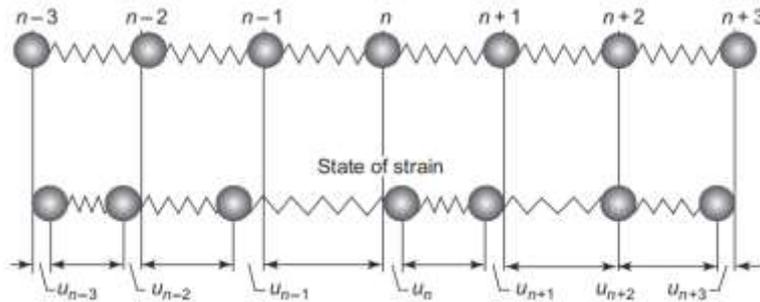
Sebuah kamera dengan radius 57.3 mm digunakan untuk mengamati pola difraksi serbuk emas (FCC) dengan parameter kisi 4.08 Å. Sebuah cahaya monokromatik dengan radiasi  $M\alpha - K_{\alpha}$  memiliki panjang gelombang 0.71 Å. Tentukan empat nilai S yang pertama.

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | Diketahui: $R = 57.3$ mm, $\lambda = 0.71$ Å, dan $a = 4.08$ Å, maka nilai $(h^2 + k^2 + l^2)$ untuk empat refleksi pertama dari kristal FCC adalah 3, 4, 8 dan 11. Gunakan Hukum Bragg:<br>$2d \sin \theta = n\lambda$   | 0 - 10         |
| 2                  | Juga untuk kristal kubik:<br>$d_{hkl} = \frac{a}{(h^2 + k^2 + l^2)^{\frac{1}{2}}}$  | 0 - 20         |
| 3                  | Sehingga diperoleh:<br>$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2)$   | 0 - 20         |
| 4                  | Untuk $(h^2 + k^2 + l^2) = 3$ , maka:<br>$\sin^2 \theta = \frac{3(0.71)^2}{4(4.08)^2} = 0.027$<br>$\theta_1 = 8.67^{\circ}$<br>Sama halnya $(h^2 + k^2 + l^2) = 4, 8, 11$ akan diperoleh $\theta_2 = 10.02^{\circ}$ , $\theta_3 = 14.25^{\circ}$ dan $\theta_4 = 16.78^{\circ}$ | 0 - 50         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**4. KK/Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang konsep vibrasi kristal**

**Soal ke 1:**

Perhatikan Gambar yang menunjukkan Rantai linier atom identik dengan konstanta kisi = a. Dalam posisi kesetimbangan, kisi memiliki simetri translasi. Pada posisi regangan, atom ke-i dipindahkan sejauh  $U_i$  dari posisi setimbangnya



Tentukan hubungan disperse yang menyatakan hubungan antara frekuensi angular dan vektor gelombang ( $\omega$ - $k$ ) untuk kisi periodik 1D, seperti ditunjukkan pada Gambar di atas.

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | <p>Untuk menghitung gaya efektif pada sebuah atom, gaya pada atom <math>n</math> akan diberikan oleh perpindahannya dan perpindahan dari dua tetangga terdekatnya, yaitu dengan perubahan total panjang kiri dan pegas kanan terpasang padanya. Konstanta gaya akan dilambangkan dengan simbol <math>\beta</math>, sehingga:</p> $F_n = \beta[(U_{n+1} - U_n) - (U_n - U_{n-1})] = \beta[U_{n+1} - 2U_n + U_{n-1}] \quad (1)$   | 0 - 5  |
| 2  | <p>Dalam bentuk persamaan gerak:</p> $F_n = M \frac{\delta^2 U_n}{\delta t^2} = \beta[(U_{n+1} - 2U_n + U_{n-1})] \quad (2)$ <p>di mana <math>M</math> adalah massa satu atom. Solusi Persamaan (2) dalam bentuk,</p> $U_n = U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}na)) \quad (3)$ <p>di mana <math>\mathbf{k}</math> vektor gelombang = <math>2\pi/\lambda</math> dan <math>na</math> adalah posisi kesetimbangan atom ke-<math>n</math>.</p>  | 0 - 5  |
| 3  | <p>Persamaan (3) merupakan gelombang berjalan di mana semua atom berosilasi dengan frekuensi yang sama (<math>\omega</math>) dan amplitudo (<math>U_0</math>) dan memiliki vektor gelombang, <math>k</math>. Perlu juga dicatat bahwa solusi bentuk (3) dimungkinkan karena simetri translasi kisi, yaitu, adanya massa yang sama pada interval yang teratur. Jika massa memiliki nilai acak atau terdistribusi secara acak di sepanjang garis, maka solusinya diharapkan menjadi gelombang yang sangat dilemahkan.</p> | 0 - 5  |
| 4  | <p>Dalam kasus ekstrim, solusi gelombang yang merambat bahkan tidak mungkin. Menurut Persamaan (3),</p> $U_{n+1} = U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n+1)a)) \quad (4)$ $U_{n-1} = U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n-1)a)) \quad (5)$ <p>Mengganti Persamaan (3), (4), dan (5) dalam Persamaan (2), kita memperoleh ruas kiri dari Persamaan (2),</p> $M \frac{\delta^2}{\delta t^2} [U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n+1)a))] = M(i)^2 \omega^2 U_n = -M\omega^2 U_n \quad (6)$                                       | 0 - 15 |
| 5  | <p>Ruas sebelah kanan,</p>  | 0 - 15 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $\beta[U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n+1)a)) - 2U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}na))] + U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(n-1)a))$ $= \beta U_0 \exp(i(\omega t - \mathbf{k}na)) [\exp(-i\mathbf{k}a) - 2 + \exp(i\mathbf{k}a)] = -2\beta U_n (1 - \cos \mathbf{k}a) \quad (7)$  |                |
| 6                  | <p>Bandingkan ruas kiri (Pers. 6) dan ruas kanan (Pers. 7):</p> $-M\omega^2 U_n = -2\beta U_n (1 - \cos \mathbf{k}a)$ $M\omega^2 U_n = 2\beta U_n (1 - \cos \mathbf{k}a) = 2\beta \left[ \cos^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} + \sin^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} - \cos^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} + \sin^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} \right]$ $\omega^2 = \frac{2\beta}{M} \left( \sin^2 \frac{\mathbf{k}a}{2} \right) \rightarrow \omega = \pm 2 \sqrt{\frac{\beta}{M}} \left( \sin \frac{\mathbf{k}a}{2} \right) = 2\omega_M \sin \frac{\mathbf{k}a}{2} \quad (8)$ <p>dengan</p> $\omega_M = \pm \sqrt{4 \frac{\beta}{M}} \quad (9)$ | 0 - 20         |
| 7                  | <p>Dalam Persamaan (8), tanda negatif telah diabaikan karena frekuensinya tidak boleh negatif. Pada batas panjang gelombang panjang,</p> $\mathbf{k}a = \frac{2\mu}{\lambda} a \quad (10)$ <p>dan ketika <math>\lambda</math> sangat panjang, <math>\mathbf{k}a</math> menjadi sangat kecil, sehingga,</p> $2 \sqrt{\frac{\beta}{M}} \left( \sin \frac{\mathbf{k}a}{2} \right) = 2 \sqrt{\frac{\beta}{M}} \left( \frac{\mathbf{k}a}{2} \right) = \sqrt{\frac{\beta}{M}} a \mathbf{k} \quad (11)$   | 0 - 15         |
| 8                  | <p>Sehingga persamaan (8) dapat ditulis menjadi:</p> $\omega = \sqrt{\frac{\beta}{M}} a \mathbf{k} = \vartheta \mathbf{k}$ $\vartheta = \sqrt{\frac{\beta}{M}} a \quad (12)$ <p>Yang menyatakan hubungan dispersi antara frekuensi angular dan vektor gelombang (<math>\omega</math>-<math>\mathbf{k}</math>) untuk kisi periodik 1D.</p>  | 0 - 20         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 2:**

Jika kecepatan bunyi dalam padatan diambil sekitar  $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  dan jarak interatomik  $3 \times 10^{-10} \text{ m}$ , hitung nilai frekuensi cutoff pada kisi linera.

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Diberikan $v = 3 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$ , $a = 3 \times 10^{-10} \text{ m}$ , maka frekuensi kritis (cutoff) akan terjadi pada saat $k = \pi/a$ (pada saat $\lambda \cong 2a$ ), | 0 - 50 |
| 2  | maka:  | 0 - 50 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $v = \lambda\nu = 2va \rightarrow \nu = \frac{v}{2a} = \frac{3 \times 10^3}{2 \times 3 \times 10^{-10}} = 5 \times 10^{12} \text{ Hz}$ |                |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

Jika kecepatan bunyi dalam padatan berada pada orde  $10^3 \text{ ms}^{-1}$ , dibandingkan frekuensi gelombang bunyi  $\lambda = 10 \text{ \AA}$  untuk (a) sistem monoatomik, (b) Gelombang akustik dan optik dalam sistem diatomik yang mengandung dua atom identik ( $m = M$ ) per sel satuan dengan jarak interatomik  $2.5 \text{ \AA}$ .

a. Sistem monoatomik

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor          |
|--------------------|---|---------------|
| 1                  | Diberikan kecepatan bunyi $v_0 = 10^3 \text{ ms}^{-1}$<br>Untuk kasus kisi monoatomik, frekuensi dinyatakan sebagai:<br>$\omega = v_0 k = v_0 \frac{2\pi}{\lambda} = 10^3 \times \frac{2\pi}{10 \times 10^{-10}} = 6.28 \times 10^{12} \text{ rad/s}$ | 0 - 10        |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 10</b> |

b. Gelombang akustik dan optik dalam sistem diatomik yang mengandung dua atom identik ( $m = M$ ) per sel satuan dengan jarak interatomik  $2.5 \text{ \AA}$ .

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Untuk gelombang akustik dalam kisi diatomik (identik ( $m = M$ )) frekuensi bervariasi antara<br>$\omega = 0$ , pada $k = 0$ sampai $\omega = \left(\frac{2K}{m}\right)^{1/2}$ , pada $k = \frac{2\pi}{\lambda}$                   | 0 - 20 |
| 2  | Pernyataan untuk kecepatan diberikan oleh:<br>$v_0 = a \left(\frac{2K}{m}\right)^{1/2}$<br>atau:<br>$\omega = \frac{v_0}{a} = \left(\frac{2K}{m}\right)^{1/2} = \frac{10^3}{2.5 \times 10^{-10}} = 4 \times 10^{12} \text{ rad/s}$ | 0 - 20 |
| 3  | Untuk gelombang optik:<br>$\omega = \left(\frac{4K}{m}\right)^{1/2}$ pada $k = 0$ , sampai $\omega = \left(\frac{2K}{m}\right)^{1/2}$ pada $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  | 0 - 20 |
| 4  | Sehingga:<br>$\omega = \sqrt{2} \left(\frac{v_0}{a}\right) = 4\sqrt{2} \times 10^{12} \text{ rad/s} (k = 0)$   | 0 - 20 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $\omega = \left(\frac{v_0}{a}\right) = 4 \times 10^{12} \text{ rad/s} \left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$ |                |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>1 - 100</b> |

**5. KK/ Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan**

**Soal ke 1:**

Cahaya tampak dengan panjang gelombang  $5000 \text{ \AA}$  mengalami penghamburan oleh kristal dengan indeks bias  $n = 1.5$ . Hitung frekuensi maksimum dari fonon yang dibangkitkan dan perubahan fraksional frekuensi dari radiasi yang datang, jika diberikan kecepatan rambat bunyi dalam kristal adalah  $5000 \text{ ms}^{-1}$ .

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | Frekuensi fonon yang diemisikan dinyatakan dalam persamaan:<br>$\omega = \frac{2v_s \omega_{fonon} n}{c} \sin \frac{\phi}{2}$  | 0 - 10         |
| 2                  | Frekuensi radiasi datang $\omega_{fonon}$ dihitung menggunakan:<br>$\omega_{fonon} = 2\pi\nu = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2\pi \frac{3 \times 10^8}{5000 \times 10^{-10}} = 3.77 \times 10^{15} \text{ rad/s}$                         | 0 - 15         |
| 3                  | Pada saat $\omega$ maksimum, maka:<br>$\sin \frac{\phi}{2} = 1$  | 0 - 10         |
| 4                  | Dengan $\phi$ menyatakan sudut hamburan<br>$\omega = \frac{2v_s \omega_{fonon} n}{c} = \frac{2 \times 5000 \times 3.77 \times 10^{15} \times 1.5}{3 \times 10^8}$<br>$\omega = 1.86 \times 10^{11} \text{ rad/s}$                    | 0 - 20         |
| 5                  | Jika $\omega'_{foton}$ menyatakan frekuensi foton terhambur, maka:<br>$\omega_{fonon} - \omega'_{foton} = \omega$  | 0 - 10         |
| 6                  | Sehingga, perubahan fraksional frekuensi foton yang datang adalah:<br>$\frac{\omega_{fonon} - \omega'_{foton}}{\omega_{fonon}} = \frac{\omega}{\omega_{fonon}} = \frac{1.86 \times 10^{11}}{3.77 \times 10^{15}} = 5 \times 10^{-5}$ | 0 - 35         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 2:**

Emas memiliki struktur yang sama dengan struktur tembaga. Jika diketahui kecepatan rambat bunyi di dalam emas adalah  $2100 \text{ ms}^{-1}$  dan dalam tembaga  $3800 \text{ ms}^{-1}$ . Jika temperatur Debye tembaga adalah  $348 \text{ K}$ , maka tentukan

temperatur Debye dalam emas. Kerapatan emas dan tembaga masing-masing adalah  $1.93 \times 10^4 \text{ kgm}^{-3}$  dan  $8960 \text{ kgm}^{-3}$  dengan berat atom keduanya masing-masing 197.0 dan 63.54 amu.

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | <p>Temperatur Debye, <math>\theta_D</math> dinyatakan sebagai:</p> $\theta_D = \frac{h\nu_D}{k_B}$ <p>Dimana <math>\nu_D</math> menyatakan frekuensi Debye yang diberikan oleh:</p> $\nu_D^3 = \frac{9N}{4\pi V} \left( \frac{1}{\nu_l^3} + \frac{2}{\nu_t^3} \right)$ <p>Dimana <math>N</math> menyatakan jumlah atom yang terdapat pada pada kristal dengan volume <math>V</math>, serta <math>\nu_l</math> dan <math>\nu_t</math> menyatakan kecepatan gelombang suara longitudinal dan transversal pada kristal.</p> | 0 - 20         |
| 2                  | <p>Dengan mengganti <math>\nu_l</math> dan <math>\nu_t</math> dengan <math>\nu_s</math>, maka diperoleh:</p> $\nu_D = \nu_s \left( \frac{3N}{4\pi V} \right)^{1/3}$ $\theta_D = \frac{h}{k_B} \nu_s \left( \frac{3N}{4\pi V} \right)^{1/3}$  | 0 - 20         |
| 3                  | <p>Tinjau untuk 1 mole atom:</p> $\theta_D = \frac{h\nu_s}{k_B} \left( \frac{3N_a\rho}{4\pi M} \right)^{1/3}$  | 0 - 10         |
| 4                  | <p>Sehingga:</p> $(\theta_D)_{Cu} = \frac{h}{k_B} (\nu_s)_{Cu} \left( \frac{3N_a\rho_{Cu}}{4\pi M_{Cu}} \right)^{1/3}$ $(\theta_D)_{Au} = \frac{h}{k_B} (\nu_s)_{Au} \left( \frac{3N_a\rho_{Au}}{4\pi M_{Au}} \right)^{1/3}$ $(\theta_D)_{Au} = (\theta_D)_{Cu} \frac{(\nu_s)_{Au}}{(\nu_s)_{Cu}} \left( \frac{M_{Cu}\rho_{Au}}{M_{Au}\rho_{Cu}} \right)^{1/3}$ $(\theta_D)_{Au} = 348 \left( \frac{2100}{3800} \right) \left( \frac{63.54 \times 1.93 \times 10^4}{197.0 \times 8960} \right)^{1/3} = 170 \text{ K}$    | 0 - 50         |
| 5                  |  | 0 - 10         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

Diketahui bahwa jari-jari ion-ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  adalah 0.98 dan 1.81 Å. Modulus Young untuk NaCl dalam arah [100] adalah  $5 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$ . Dengan asumsi bahwa perluasan arah [100] yang dihasilkan kontraksi diabaikan dalam arah tegak lurus, maka hitung panjang gelombang yang mana radiasi elektromagnetik sangat kuat dipantulkan oleh kristal NaCl. Massa atom Na dan Cl masing-masing 23 dan 35.5.

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | <p>Frekuensi sangat kuat dipantulkan oleh kristal ionik dinyatakan sebagai:</p> $\omega^2 = 2\beta \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right)$ <p>Dimana <math>m</math> dan <math>M</math> menyatakan massa masing-masing ion dan <math>\beta</math> konstanta gaya. Karena pelebaran arah [100] yang menghasilkan kontraksi yang diabaikan dalam arah tegak lurus, maka:</p> $\beta = aY$ <p>Dimana <math>a</math> menyatakan jarak interatomik dan <math>Y</math> menyatakan modulus Young.</p> $\omega^2 = 2aY \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right)$ | 0 - 30         |
| 2                  | <p>Jarak interatomik sepanjang arah [100] dari NaCl dinyatakan sebagai penjumlahan jari-jari ion <math>\text{Ca}^+</math> dan <math>\text{Cl}^-</math>:</p> $\omega^2 = 2(0.98 + 1.81) \times 10^{-10} \times 5 \times 10^{10} \times \left( \frac{1}{23} + \frac{1}{35.5} \right) \times \frac{1}{1.67 \times 10^{-27}}$ $\omega = 3.46 \times 10^{13} \text{ rad/s}$  | 0 - 40         |
| 3                  | <p>Panjang gelombang elektromagnetik yang kuat dipantulkan oleh NaCl adalah:</p> $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi \times 3 \times 10^{10}}{3.46 \times 10^{13}} = 5.45 \times 10^{-3} \text{ m}$   | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**6. KK/ Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami tentang teori elektron bebas pada logam**

**Soal ke 1:**

Jari-jari atomik sodium adalah 1.86 Å. Hitung energi Fermi sodium pada saat temperatur nol mutlak.

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | Energi Fermi pada saat $K = 0$ dinyatakan dengan hubungan:<br>$E_{F0} = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{2/3}$ Dimana $N$ menyatakan sebagai elektron bebas (elektron valensi), dimana jumlah elektron valensi pada atomo sodium adalah 2.       | 0 - 20         |
| 2                  | Dengan memandang bahwa atom sodium memiliki struktur BCC, maka:<br>Jari-jari atom sodium,<br>$r = 1.86 \times 10^{-10} \text{ m}$   | 0 - 20         |
| 3                  | Volume sel satuan,<br>$V = a^3 = \left( \frac{4r}{\sqrt{3}} \right)^3 = \left( \frac{4 \times 1.86 \times 10^{-10}}{\sqrt{3}} \right)^3 = 7.93 \times 10^{-29} \text{ m}^3$ $\frac{N}{V} = \frac{2}{7.93 \times 10^{-29}} = 2.52 \times 10^{28} \text{ elektron/m}^3$ | 0 - 30         |
| 4                  | Jadi:<br>$E_{F0} = \frac{(1.05 \times 10^{-34})^2}{2(9.1 \times 10^{-31})} (3\pi^2 \times 2.52 \times 10^{28})^{2/3}$ $E_{F0} = 4.98 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.11 \text{ eV}$   | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 2:**

Turunkan hubungan tekanan terhadap volume untuk gas elektron bebas pada 0 K. Selanjutnya dapatkan hubungan untuk modulus bulk dalam bentuk energi kinetik rata-rata.

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Dari hubungan termodinamika diperoleh:<br>$P = - \frac{\partial E}{\partial V}$ Dimana $E$ menyatakan energi internal sistem dengan partikel yang menempati volume $V$ pada tekanan $P$ , Untuk gas elektron bebas yang mengandung $N$ elektron dengan energi kinetik rata-rata $\bar{E}_0$ pada 0 K, | 0 - 10 |
| 2  | selanjutnya energi $E$ dapat digantikan dengan $N\bar{E}_0$ , sehingga diperoleh:<br>$P = -N \frac{\partial \bar{E}_0}{\partial V}$   | 0 - 10 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
| 3                  | Oleh karena,<br>$P = -\frac{3}{5}N \frac{\partial E_{F0}}{\partial V}$ serta:<br>$E_{F0} = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{2/3}$   | 0 - 20         |
| 4                  | Yang memberikan:<br>$\frac{\partial E_{F0}}{\partial V} = -\frac{2}{3} \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3} \left( \frac{1}{V} \right)^{5/3}$ $P = \frac{2}{5} N \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3} \left( \frac{1}{V} \right)^{5/3}$ $P = \frac{2}{5} N \frac{E_{F0}}{V}$ | 0 - 30         |
| 5                  | Yang menyatakan hubungan antara tekanan terhadap volume untuk gas elektron bebas pada 0 K. Selanjutnya modulus Bulk dinyatakan dalam hubungan:<br>$B = -V \frac{\partial P}{\partial V}$   | 0 - 10         |
| 6                  | Turunkan tekanan P terhadap V, diperoleh:<br>$\frac{\partial P}{\partial V} = -\frac{5}{3} \left[ \frac{2}{5} N \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 N)^{2/3} \right] \left( \frac{1}{V} \right)^{7/3} = -\frac{5P}{3V}$   | 0 - 10         |
| 7                  | Sehingga:<br>$B = -\frac{5}{3}P = \frac{2}{5}N \frac{E_{F0}}{V} = \frac{10}{9}N \frac{\bar{E}_0}{V} = \frac{10}{9} \frac{E}{V}$  | 0 - 10         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

Logam Na dengan struktur BCC memiliki dua atom per sel satuan. Jika jari-jari atom NA adalah 1.85 Å. Hitung resistivitas elektriknya pada saat 0 °C jika nilai klasik dari waktu bebas rata-rata pada temperatur ini adalah 3 x 10<sup>-14</sup> detik.

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Diberikan $\tau = 3 \times 10^{-14}$ detik, Na memiliki 2 atom per sel satuan sehingga $n = 2$ ,<br>$R_{Na} = 1.85 \text{ \AA} = 1.85 \times 10^{-10} \text{ m}$ . | 0 - 20 |
| 2  | Untuk struktur BCC berlaku:<br>$\sqrt{3}a = 4R$<br>$a = \frac{4}{\sqrt{3}}R = \frac{4}{\sqrt{3}}(1.85 \times 10^{-10}) = 4.27 \times 10^{-10} \text{ m}$           | 0 - 20 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
| 3                  | Jumlah elektron per satuan volume dari atom Na:<br>$n' = \frac{\rho N}{M} = \frac{n}{a^3} = \frac{2}{(4.27 \times 10^{-10})^3} = 2.57 \times 10^{28}/m^3$  | 0 - 30         |
| 4                  | Resistivitas atom Na pada 0 °C diperoleh melalui persamaan:<br>$\rho = \frac{m}{n'e^2\tau} = \frac{9.1 \times 10^{-31}}{2(.57 \times 10^{28})(1.6 \times 10^{-19})^2(3 \times 10^{-14})}$ $\rho = 4.46 \times 10^8 \Omega m$ | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**7. KK/ Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami konsep pita energi elektron**

**Soal ke 1:**

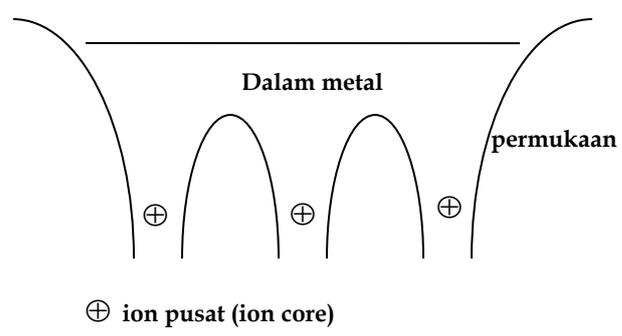
Buktikan bahwa potensial Kronig-Penney  $P \ll 1$ , dimana pita energi terendah pada  $k = 0$  dinyatakan dalam bentuk:

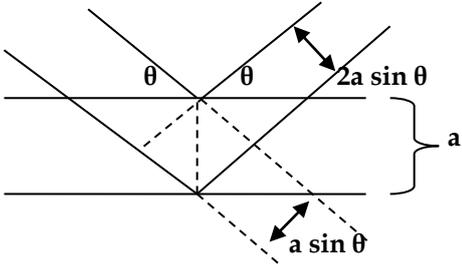
$$E = \frac{h^2 P}{4\pi^2 m a^2}$$

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | Untuk $k = 0$ , berlaku:<br>$\frac{P \sin \alpha a}{\alpha a} + \cos \alpha a = 1$ $\frac{P}{\alpha a} = \frac{1 - \cos \alpha a}{\sin \alpha a}$                             | 0 - 20         |
| 2                  | dimana:<br>$\cos \alpha a = 1 - \frac{(\alpha a)^2}{2!} + \dots \cong 1 - \frac{\alpha^2 a^2}{2}$ $\sin \alpha a = \alpha a - \frac{(\alpha a)^3}{3!} + \dots \cong \alpha a$ | 0 - 20         |
| 3                  | selanjutnya,<br>$\frac{P}{\alpha a} = \frac{(\alpha a)^2}{2\alpha a} \rightarrow P = \frac{\alpha^2 a^2}{2}$ akan tetapi,<br>$\alpha^2 = \frac{8\pi^2 m E}{h^2}$              | 0 - 30         |
| 4                  | sehingga:<br>$P = \frac{8\pi^2 m E a^2}{h^2} \cdot \frac{1}{2} \rightarrow E = \frac{h^2 P}{4\pi^2 m a^2}$  | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 2:**

Jelaskan secara singkat tentang model elektron hampir bebas (nearly free electron model) dalam menjelaskan keberadaan celah energi terlarang (energy gap) dalam zat padat yang membedakan sifat-sifat penghantarannya!

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Prilaku elektron dalam sebuah bahan ditentukan oleh tegangan yang disebabkan oleh keadaan dari ikatan antar atom-atom yang tersusun, dimana atom tidak termasuk pada sejumlah terbatas atom-atom yang menyusun zat padat. Seperti halnya pada ikatan kovalen tetapi terikat dan dimiliki bersama oleh atom-atom yang menyusunnya.  | 0 - 5  |
| 2  | Struktur pita dari kristal dapat dijelaskan dengan Model Elektron Hampir Bebas (Nearly Free Electron Model) yang mana pita elektron akan dinyatakan sebagai gangguan (perturbed) lemah oleh potensial periodik dari atom pusat (ion cores), Model ini menjawab semua pertanyaan yang muncul secara kualitatif mengenai prilaku elektron dalam metal.   | 0 - 5  |
| 3  |   | 0 - 10 |
| 4  | Pemantulan Bragg (Bragg Reflection) merupakan ciri karakteristik dari perambatan gelombang dalam kristal, adanya pemantulan Bragg dari gelombang elektron dalam kristal yang menyebabkan timbulnya celah energi.   | 0 - 5  |
| 5  | Konsep Mekanika Kuantum dari persamaan Schrödinger tidak dapat membuktikan adanya celah energi. Dengan kata lain bahwa celah energi ini hanya terdapat pada elektron-elektron yang berada dalam medan tegangan periodik, sehingga disini dipakai pengertian kristal bukan zat padat secara umum karena pada kristal umumnya memiliki medan tegangan yang periodik. Konsep celah energi ini secara signifikan bisa digunakan untuk membedakan zat padat yang termasuk kategori konduktor maupun isolator. | 0 - 5  |

|    |   |        |
|----|---|--------|
| 6  | <p>Secara fisik, asal mula timbulnya celah energi dapat ditinjau untuk kisi zat padat linear dengan jarak antar kristal <math>a</math>, tetapi sebelumnya kita tinjau dulu pemantulan Bragg untuk kasus ini :</p>  <p> beda jalan = <math>2a \sin \theta</math><br/> syarat terjadinya pemantulan :<br/> <math>2a \sin \theta = n\lambda</math><br/> <math>2a \sin \theta = \frac{2\pi n}{k}</math><br/> <math>a \sin \theta = \frac{n\pi}{k} \rightarrow k = \frac{n\pi}{a \sin \theta}</math> </p>   | 0 - 10 |
| 7  | <p>Jika dibuat grafik <math>\epsilon_k</math> terhadap <math>k</math> untuk elektron bebas akan kita lihat. Untuk elektron yang hampir bebas, ketika harga <math>k</math> mendekati <math>\pi/a</math>, maka energi <math>\epsilon_k</math> akan terus bertambah, tetapi untuk <math>k = \pm\pi/a</math>, <math>\epsilon_k</math> memiliki dua harga yang bawah termasuk daerah Brillouin pertama dengan daerah antara <math>\pi/a</math> sampai <math>-\pi/a</math> dan yang atas termasuk daerah Brillouin kedua untuk kelipatan <math>n</math> bulat berikutnya, diantara kedua daerah ini terdapat celah terlarang, dimana setiap elektron tidak boleh memiliki keadaan energi ini.</p> | 0 - 10 |
| 8  | <p>Syarat difraksi Bragg untuk difraksi gelombang dengan vektor gelombang <math>\mathbf{k}</math> akan menjadi satu dimensi :</p> $(\mathbf{k} + \mathbf{G})^2 = k^2$ <p>Jika <math>G = 2\pi n/a</math>, maka :</p> $k = \pm \frac{1}{2}G = \pm n\pi/a$   | 0 - 10 |
| 9  | <p>Loncatan energi pada daerah Brillouin merupakan akibat langsung dari fakta bahwa pembatasan harga <math>k</math> bersesuaian dengan gelombang berdiri (standing wave) dalam bentuk gelombang berjalan (traveling wave).</p>  | 0 - 10 |
| 10 | <p>Tinjau gelombang berjalan dalam arah <math>x</math> yang dinyatakan dalam bentuk <math>\exp(i\pi x/a)</math> dan <math>\exp(-i\pi x/a)</math>. Pada saat <math>k = \pm\pi/a</math> gelombang tersebut akan terpantul Bragg bolak-balik, sehingga gelombang yang terbentuk akan memiliki dua kemungkinan yaitu :</p> $\psi(+)= \exp(i\pi x/a)+ \exp(-i\pi x/a)= 2 \cos(\pi x/a)$ $\psi(-)= \exp(i\pi x/a)- \exp(-i\pi x/a)= 2i \sin(\pi x/a)$ <p>tanda (+) dan (-) menunjukkan arah bolak-balik dari <math>-x</math> ke <math>+x</math> dan sebaliknya.</p>   | 0 - 10 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
| 11                 |  | 0 - 20         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

Jelaskan beberapa kelemahan penggunaan model elektron bebas (*free electron model*) dalam menjelaskan sifat-sifat zat padat secara keseluruhan!

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | Beberapa kelemahan model ini diantaranya:<br>a. Tidak bisa menjelaskan tentang perbedaan antara metal, semimetal, semikonduktor dan isolator.<br>b. Tidak bisa menjelaskan keberadaan muatan positif dari koefisien Hall.<br>c. Tidak bisa menjelaskan hubungan antara elektron konduksi dalam metal dengan elektron valensi dari atom bebas.<br>d. Tidak bisa menjelaskan tentang adanya proses/gejala transport yang terjadi dalam zat padat. | 0 - 50         |
| 2                  | Elektron dalam kristal zat padat akan tersusun dalam pita-pita energi yang dipisahkan oleh daerah energi dimana tidak terdapat orbital gelombang elektron, celah ini disebut celah terlarang ( <i>energy gap</i> ) atau celah pita ( <i>band gap</i> ) yang merupakan hasil interaksi dari gelombang elektron konduksi dengan ion pusat ( <i>ion cores</i> ) dalam kristal. Hal inilah yang tidak bisa dijelaskan oleh Model Elektron Bebas.    | 0 - 50         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 4:**

Model elektron bebas untuk logam, mengasumsikan bahwa elektron konduksi dapat diaproksimasi dengan gas elektron bebas, dimana parameter untuk gas yang penting yaitu  $n$  jumlah kerapatan elektron dan  $\tau$

waktu antar tumbukan elektron. Tunjukkan bahwa konduktivitas listrik dari model ini untuk logam dinyatakan dengan persamaan :

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

Jika diketahui resistivitas logam Cu  $1.7 \times 10^{-6}$  Ohm cm dan kerapatan atom Cu  $8.5 \times 10^{28}$  atom/cm<sup>3</sup>, perkirakan waktu tumbukan  $\tau$  dari elektron Cu.

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Momentum elektron bebas $\vec{p}$ dan vektor gelombang $\vec{k}$ dinyatakan dengan hubungan :<br>$\vec{p} = \hbar\vec{k}$  | 0 - 10 |
| 2  | persamaan gerak elektron akibat pengaruh medan gaya $\vec{F}$ dinyatakan dengan hukum II Newton:<br>$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \hbar \frac{d\vec{k}}{dt}$  | 0 - 10 |
|    | vektor gelombang semua elektron akan meningkat dengan bertambahnya $\vec{F}$ , keadaan setimbang akan dicapai jika elektron kembali ke keadaan semula akibat tumbukan dengan ion-ion kisi yang dikenal dengan istilah waktu relaksasi tumbukan $\tau$ , yang dinyatakan dengan :<br>$\delta\vec{k} = \frac{\tau}{\hbar} \vec{F}$ | 0 - 10 |
|    | dimana $\delta\vec{k}$ adalah perubahan vektor gelombang $\vec{k}$ dari nilai setimbangnya, bersesuaian dengan itu perubahan kecepatan :<br>$\delta\vec{v} = \frac{\delta\vec{p}}{m} = \frac{\hbar}{m} \delta\vec{k}$<br>$= \frac{\tau\vec{F}}{m}$   | 0 - 10 |
|    | gaya yang bekerja pada elektron dalam medan listrik $\vec{\xi}$ :<br>$\vec{F} = -e\vec{\xi}$   | 0 - 10 |
|    | kerapatan arus induksi dinyatakan dengan :<br>$\vec{J} = -ne\delta\vec{v} = \frac{ne^2\tau}{m} \vec{\xi} = \sigma\vec{\xi}$  | 0 - 10 |
|    | dimana konduktivitas logam dinyatakan sebagai :<br>$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$   | 0 - 10 |
|    | jika setiap satu elektron bebas berkontribusi dalam tiap atom Cu, maka $n = 8.5 \times 10^{28} / m^3$ , sehingga waktu tumbukan $\tau$ :   | 0 - 30 |

|   |                |
|---|----------------|
| $\tau = \frac{m\sigma}{ne^2} = \frac{m}{ne^2\rho} = \frac{(9.11 \times 10^{-31})}{(8.5 \times 10^{28})(1.6 \times 10^{-29})(1.7 \times 10^{-8})} = 2.5 \times 10^{-14} \text{ s}$ |                |
| <b>Jumlah Skor</b>  | <b>0 - 100</b> |

**8. KK/ Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi**

**Soal ke 1:**

Energi yang berdekatan dengan ujung pita valensi pada suatu kristal dinyatakan sebagai:

$$E = -AK^2$$

Dimana  $A = 10^{-39} \text{ Jm}^2$ . Sebuah elektron dengan vektor gelombang  $\mathbf{k} = 10^{10} \mathbf{k}_x \text{ m}^{-1}$  telah terhapus dari orbital pada pita valensi yang terisi penuh. Tentukan massa efektif, kecepatan, momentum dan energi hole.

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | Diketahui:<br>$E = -AK^2$ $\frac{dE}{dk} = -2AK \rightarrow \frac{d^2E}{dk^2} = -2A$  | 0 - 10         |
| 2                  | Jika diketahui massa efektif elektron dinyatakan sebagai:<br>$m_e^* = \frac{\hbar^2}{\left(\frac{d^2E}{dk^2}\right)} = -\frac{\hbar^2}{2A} = \frac{(1.05 \times 10^{-34})^2}{2 \times 10^{-39}} = -5.5 \times 10^{30} \text{ kg}$ | 0 - 20         |
| 3                  | Karena massa efektif hole berlawanan dengan massa efektif elektron pada lokasi yang sama pada pita energi, sehingga massa efektif hole menjadi:<br>$m_h^* = -m_e^* = 5.5 \times 10^{30} \text{ kg}$                               | 0 - 10         |
| 4                  | Vektor gelombang hole juga berlawanan dengan vektor gelombang elektron :<br>$\mathbf{k}_h = -\mathbf{k}_e = -10^{10} \mathbf{k}_x \text{ m}^{-1}$   | 0 - 10         |
| 5                  | Momentum hole:<br>$\mathbf{p}_h = \hbar\mathbf{k} = -1.05 \times 10^{-34} \times 10^{10} \mathbf{k}_x = -1.05 \times 10^{-24} \mathbf{k}_x \text{ Js m}^{-1}$   | 0 - 10         |
| 6                  | Kecepatan hole:<br>$\mathbf{v}_h = \frac{\mathbf{p}_h}{m_h^*} = -\frac{1.05 \times 10^{-24} \mathbf{k}_x}{5.5 \times 10^{30}} = -1.9 \times 10^5 \mathbf{k}_x \text{ ms}^{-1}$  | 0 - 20         |
| 7                  | Energi elektron dengan vektor gelombang $\mathbf{k}_e$ adalah:<br>$E_e = -Ak_e^2 = -10^{-39} \times (10^{10} \mathbf{k}_x)^2 = -10^{-19} \text{ J}$   | 0 - 10         |
| 8                  | Sehingga energi hole menjadi:<br>$E_h = -E_e = 10^{-19} \text{ J}$  | 0 - 10         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 2:**

Dalam pita energi elektron bergerak dalam bentuk paket gelombang, akibat pengaruh medan listrik  $\vec{\xi}$ . Buktikan bahwa persamaan gerak elektron tersebut dinyatakan dalam bentuk :

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{F}$$

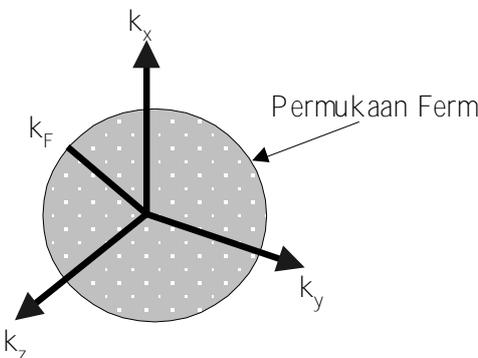
| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | Kecepatan group gelombang :<br>$\vec{v}_g = \frac{d\vec{\omega}}{d\vec{k}}$  | 0 - 10         |
| 2                  | frekuensi diasosiasikan dengan fungsi gelombang dengan energi $\epsilon$ :<br>maka :<br>$\omega = \frac{\epsilon}{\hbar}$<br>$\vec{v}_g = \frac{1}{\hbar} \frac{d\epsilon}{d\vec{k}} \quad \text{atau} \quad \vec{v} = \frac{1}{\hbar} \nabla_k \epsilon(\vec{k})$ | 0 - 20         |
| 3                  | pengaruh kristal terhadap gerak elektron menghasilkan hubungan dispersi $\epsilon(\vec{k})$ . Kerja yang dilakukan $\delta\epsilon$ pada elektron oleh medan listrik $\vec{\xi}$ pada interval $\delta t$ :<br>$\delta\epsilon = -e\vec{\xi}\vec{v}_g\delta t$     | 0 - 20         |
| 4                  | misalkan bahwa :<br>$\delta\epsilon = \left(\frac{d\epsilon}{d\vec{k}}\right)\delta\vec{k} = \hbar\vec{v}_g\delta\vec{k}$  | 0 - 10         |
| 5                  | akan diperoleh :<br>$\delta\vec{k} = -\left(\frac{e\vec{\xi}}{\hbar}\right)\delta t$<br>$\hbar \frac{\delta\vec{k}}{\delta t} = -e\vec{\xi}$   | 0 - 20         |
| 6                  | suku kanan tidak lain adalah bentuk gaya eksternal akibat medan $\vec{\xi}$ , sehingga :<br>$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{F}$  | 0 - 20         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

Buktikan bahwa jumlah orbital per satuan energi pada tingkat energi Fermi adalah merupakan jumlah total elektron konduksi dibagi dengan energi Fermi, secara matematis dinyatakan sebagai :

$$D(\epsilon) \equiv \frac{dN}{d\epsilon} = \frac{3N}{2\epsilon}$$

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Tinjau persamaan Schrödinger 3D untuk partikel bebas :<br>$-\frac{\hbar}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi_k(\vec{r}) = \epsilon_k \psi_k(\vec{r})$   | 0 - 5  |
| 2  | jika elektron berada dalam kubus dengan sisi $L$ , maka fungsi gelombangnya dinyatakan sebagai gelombang berdiri :<br>$\psi_n(\vec{r}) = A \sin\left(\frac{\pi n_x x}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi n_y y}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi n_z z}{L}\right)$<br>dimana $n_x, n_y, n_z$ bilangan bulat positif.                                    | 0 - 5  |
| 3  | Dengan menggunakan syarat batas periodik, maka fungsi gelombang periodik dinyatakan dalam $x, y, z$ dengan perioda $L$ :<br>$\psi(x+L, y, z) = \psi(x, y, z)$<br>hal ini berlaku untuk koordinat $y, z$ .   | 0 - 5  |
| 4  | Fungsi gelombang memenuhi persamaan Schrödinger untuk partikel bebas dan syarat periodisitas dalam bentuk gelombang bidang menjalar (traveling plane wave) :<br>$\psi_k(\vec{r}) = \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r})$  | 0 - 5  |
| 5  | dengan komponen vektor gelombang $\vec{k}$ memenuhi :<br>$k_x = 0; \quad \pm \frac{2\pi}{L}; \quad \pm \frac{4\pi}{L}; \quad \dots\dots\dots$<br>sama halnya untuk komponen $k_y$ dan $k_z$ .   | 0 - 5  |
| 6  | Setiap komponen $\vec{k}$ dinyatakan dalam bentuk $\frac{2n\pi}{L}$ , dimana $n$ bilangan bulat positif atau negatif dan mencirikan bilangan kuantum, sehingga diperoleh :<br>$\begin{aligned} \exp(ik_x(x+L)) &= \exp\left(i \frac{2n\pi(x+L)}{L}\right) \\ &= \exp\left(i \frac{2n\pi x}{L}\right) \exp(i2n\pi) = \exp(ik_x x) \end{aligned}$ | 0 - 10 |
| 7  | Energi orbital $\epsilon_k$ dengan vektor gelombang $\vec{k}$ :   | 0 - 5  |

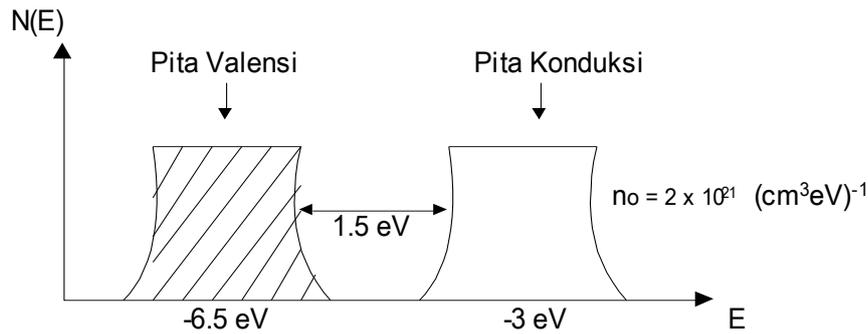
|    |  |        |
|----|--|--------|
|    | $\epsilon_k = \frac{\hbar^2}{2m} k^2 = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$ <p>dalam hal ini <math>k = 2\pi/\lambda</math>.</p>   |        |
| 8  | <p>Momentum linear <math>\vec{p}</math>, dinyatakan dalam Mekanika Kuantum sebagai operator <math>\vec{p} = -i\hbar\nabla</math>, sehingga :</p> $p\psi_k(\vec{r}) = -i\hbar\nabla\psi_k(\vec{r}) = \hbar\vec{k}\psi_k(\vec{r})$ <p>Gelombang bidang <math>\psi_k(\vec{r})</math> adalah fungsi eigen momentum linear dengan nilai eigen <math>\hbar k</math>.</p> | 0 - 10 |
| 9  | <p>Kecepatan partikel dalam orbital <math>\vec{k}</math> diberikan oleh :</p> $v = \frac{\hbar k}{m}$  | 0 - 5  |
| 10 | <p>Dalam keadaan dasar (ground state) sistem dengan <math>N</math> elektron bebas menempati orbital berupa titik-titik dalam ruang bola <math>\vec{k}</math>, tingkat energi Fermi terletak dipermukaan bola dengan vektor gelombang <math>\vec{k}_F</math> :</p> $\epsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} k_F^2$  | 0 - 5  |
| 11 | <p>Jumlah total orbital yang ditempati elektron dalam ruang <math>\vec{k}</math> dinyatakan sebagai :</p> $N = 2 \cdot \frac{4\pi k_F^3 / 3}{(2\pi/L)^3} = \frac{V}{3\pi^2} k_F^3$ <p>dimana faktor 2 menunjukkan dua nilai yang mungkin ditempati oleh <math>m_s</math> bilangan kuantum spin.</p>  | 0 - 5  |
| 12 | <p>Setiap tingkat orbital yang ditempati akan memiliki nilai <math>k</math> yang bergantung pada konsentrasi partikel :</p> $k_F = \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{1/3}$  <p>sehingga :</p>   | 0 - 10 |

|                    |   |                |
|--------------------|---|----------------|
|                    | $\epsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{2/3}$ <p>yang menyatakan hubungan antara tingkat Fermi dengan konsentrasi elektron <math>N/V</math></p>   |                |
| 13                 | <p>kecepatan elektron dalam permukaan Fermi :</p> $v_F = \left( \frac{\hbar k_F}{m} \right) = \left( \frac{\hbar}{m} \right) \left( \frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{1/3}$ <p>jika <math>D(\epsilon)</math> menyatakan rapat keadaan,</p>  | 0 - 5          |
| 14                 | <p>maka jumlah orbital per satuan energi dinyatakan sebagai :</p> $N = \frac{V}{3\pi^2} \left( \frac{2m\epsilon}{\hbar^2} \right)^{3/2} \quad *)$ <p>maka :</p> $D(\epsilon) \equiv \frac{dN}{d\epsilon} = \frac{V}{2\pi^2} \left( \frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \epsilon^{1/2}$ | 0 - 10         |
| 15                 | <p>jika persamaan *) dapat disederhanakan menjadi :</p> $\ln N = \frac{3}{2} \ln \epsilon + K$ <p>dengan <math>K</math> suatu konstanta, sehingga :</p> $\frac{dN}{N} = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon}{\epsilon}$   | 0 - 5          |
| 16                 | <p>akan didapatkan :</p> $D(\epsilon) = \frac{dN}{d\epsilon} = \frac{3N}{2\epsilon}$  | 0 - 5          |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**9. KK/ Sub CPMK: Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor**

**Soal ke 1:**

Tinjau suatu semikonduktor intrinsik dengan fungsi rapat keadaan  $N(E)$  seperti yang ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :



a. Dimana tingkat energi Fermi terhadap pita valensi dan pita konduksi ?.

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor          |
|--------------------|--|---------------|
| 1                  | <p>Jumlah elektron dalam pita konduksi dengan tingkat energi <math>\epsilon_C</math> dan jumlah hole dalam pita valensi dengan tingkat energi <math>\epsilon_V</math> dinyatakan sebagai :</p> $n = \int_{\epsilon_C}^{\infty} N(E)f(E)dE$ $p = \int_{-\infty}^{\epsilon_V} N(E)(1 - f(E))dE$                          | 0 - 20        |
| 2                  | <p>fungsi distribusi Fermi-Dirac dinyatakan sebagai :</p> $f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1}$   | 0 - 10        |
| 3                  | <p>fungsi ini menyatakan probabilitas bahwa suatu tingkat energi <math>E</math> ditempati. Untuk Semikonduktor intrinsik <math>n = p</math>. Tinjau kasus dimana <math>E - E_F \gg k_B T</math>, maka :</p> $f(E) = e^{-(E-E_F)/k_B T}$  | 0 - 20        |
| 4                  | <p>maka :</p> $n \cong \int_{\epsilon_C}^{\infty} n_0 e^{-(E-E_F)/k_B T} dE$ $\cong n_0 k_B T e^{-(\epsilon_C - E_F)/k_B T}$ $p \cong n_0 k_B T e^{-(E_F - \epsilon_V)/k_B T}$ <p>dengan <math>n_0</math> rapat keadaan elektron, oleh karena <math>n = p</math>, maka :</p> $E_F = \frac{\epsilon_C + \epsilon_V}{2}$ | 0 - 20        |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 70</b> |

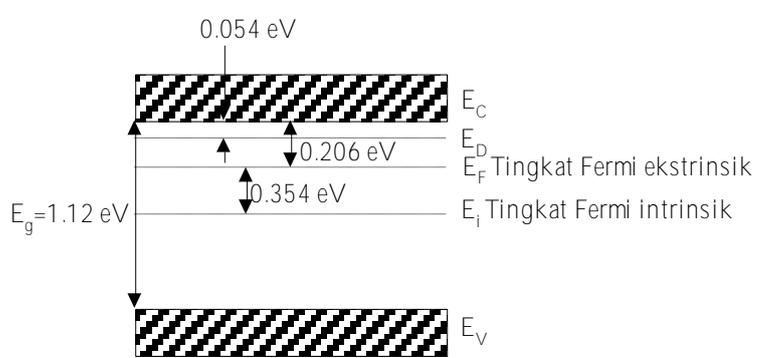
b. Hitung kerapatan elektron dalam pita konduksi pada temperatur kamar ?.

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor          |
|--------------------|--|---------------|
| 1                  | Dari hubungan :<br>$\varepsilon_C - \varepsilon_F \cong \frac{E_g}{2} = 0.75 \text{ eV}$ Pada temperatur kamar $k_B T = 1/40$ ,                            | 0 - 15        |
| 2                  | maka rapat elektron konduksi :<br>$n \cong n_o k_B T \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{k_B T}\right) \cong 4.68 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ | 0 - 15        |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 30</b> |

**Soal ke 2:**

Sebuah SK Intrinsik (kristal Si) didoping dengan  $10^{16}$  atom/cm<sup>3</sup> Arsenik (As). Tentukan konsentrasi pembawa dan tingkat energi Fermi pada temperatur kamar dan gambarkan diagram energinya!

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Atom Si merupakan atom bervalensi empat (tetravalent) didoping dengan atom bervalensi lima (As), maka akan terdapat satu elektron valensi yang berubah menjadi elektron konduksi, semikonduktor yang dihasilkan adalah tipe-n pada suhu kamar (300 K), semua atom pengotor tersebut diionisasikan sempurna, sehingga :<br>$n \cong N_D = 10^6 \text{ cm}^{-3}$ | 0 - 10 |
| 2  | gunakan hukum aksi massa :<br>$n_i^2 = np$ $p \cong \frac{n_i^2}{N_D}$ pada suhu kamar, rapat pembawa intrinsik untuk Si $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ dan rapat keadaan dalam pita konduksi $2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (Sze,1985)   | 0 - 20 |
| 3  | sehingga konsentrasi pembawa hole :<br>$p \cong \frac{(1.45 \times 10^{10})^2}{10^{16}} = 2.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$   | 0 - 10 |
| 4  | gunakan persamaan :<br>$E_C - E_F = k_B T \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) = (8.64 \times 10^{-5})(300) \ln\left(\frac{2.8 \times 10^{19}}{10^{16}}\right)$ $= (0.0259) \ln(2.8) = 0.206 \text{ eV}$  | 0 - 20 |

|                    |   |                |
|--------------------|---|----------------|
| 5                  | Tingkat Fermi diukur dari tingkat Fermi intrinsik, gunakan persamaan :<br>$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_B T}\right)$<br>logaritmanakan kedua ruas   | 0 - 10         |
| 6                  | sehingga diperoleh :<br>$\ln n = \ln n_i + \frac{E_F - E_i}{k_B T}$ $E_F - E_i = k_B T \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \cong k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$ $E_F - E_i \cong (0.0259) \ln\left(\frac{10^{16}}{1.45 \times 10^{10}}\right) \cong 0.354 \text{ eV}$ | 0 - 20         |
| 7                  | Diagram tingkat energi :<br>   | 0 - 20         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

Kristal Silikon dengan energi gap  $\varepsilon_G = 1.14 \text{ eV}$ , massa efektif hole diambil  $m_h = 0.3m$  dan massa efektif elektron  $m_e = 0.2m$

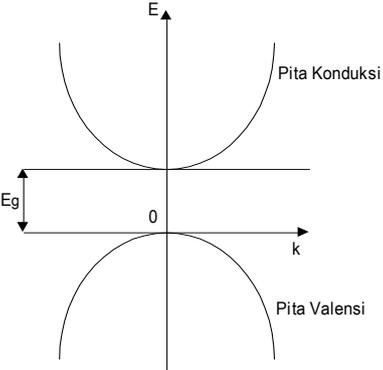
a. Turunkan pernyataan untuk fungsi  $f(T)$  dalam hukum aksi massa :

$$np = f(T)$$

dimana n dan p konsentrasi elektron dan hole, serta T suhu. (Gunakan

$$\int_0^{\infty} x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{2}})$$

| No | Komponen Penilaian  | Skor  |
|----|---|-------|
| 1  | Dekat dengan bagian bawah pita konduksi, vektor gelombang elektron $\vec{k}$ memiliki energi :<br>$E(\vec{k}) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}$ | 0 - 5 |

|   |  |        |
|---|--|--------|
|   |   |        |
| 2 | <p>jumlah keadaan persatuan volume dalam semikonduktor dalam jangkauan <math>k</math> dan <math>k + dk</math> :</p> $\frac{4\pi k^2 dk}{(2\pi)^3} = \frac{1}{4\pi^2} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2} dE$ <p>tiap <math>\vec{k}</math> bersesuaian dengan dua keadaan spin,</p>   | 0 - 5  |
| 3 | <p>maka rapat keadaan persatuan interval :</p> $g(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_g)^{1/2}$   | 0 - 5  |
| 4 | <p>jika sistem berada dalam keadaan keseimbangan thermal pada suhu <math>T</math>, maka elektron memenuhi distribusi Fermi :</p> $f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1}$ <p>dalam semikonduktor tingkat Fermi <math>E_F</math> biasanya terletak dalam pita terlarang antara pita valensi dan konduksi yang jaraknya lebih besar dari <math>k_B T</math>, <math>E - E_F \gg k_B T</math>, maka :</p> $f(E) \cong e^{(E_F - E)/k_B T}$                 | 0 - 5  |
| 5 | <p>konsentrasi elektron dalam pita konduksi :</p> $n = \int_{E_g}^{\infty} f(E)g(E)dE$ $\cong \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_g}^{\infty} (E - E_g)^{1/2} e^{(E_F - E)/k_B T} dE$ $\cong \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e k_B T}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_g - E_F)/k_B T} \int_{E_g}^{\infty} e^{-x} x^{1/2} dx$ <p>dengan <math>x = (E - E_g)/k_B T</math>, maka :</p> $n \cong N_c e^{-(E_g - E_F)/k_B T}$ | 0 - 10 |

|                    |  |               |
|--------------------|--|---------------|
|                    | dengan $N_c = 2\left(\frac{m_e k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$   |               |
| 6                  | <p>konsentrasi hole dinyatakan sebagai :</p> $p = \int_{-\infty}^0 f_h(E) g_h(E) dE$ <p>dimana :</p> $f_h(E) = 1 - f(E) \cong e^{-(E_F - E)/k_B T}$ $g_h(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_h}{\hbar^2}\right)^{3/2} (-E)^{1/2}$ | 0 - 10        |
| 7                  | <p>akan diperoleh :</p> $p \cong N_h e^{-E_F/k_B T}$ <p>dengan :</p> $N_h = 2\left(\frac{m_h k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$   | 0 - 5         |
| 8                  | <p>sehingga :</p> $f(T) = np \cong N_e N_h e^{-E_g/k_B T}$ $\cong 4(m_e m_h)^{3/2} \left(\frac{k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} e^{-E_g/k_B T}$  | 0 - 5         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 50</b> |

- b. Konsentrasi  $N_D$  dari donor pentavalent As harus ditambahkan untuk menghasilkan konduktivitas ekstrinsik  $10^4$  kali lebih besar dari konduktivitas intrinsiknya pada temperatur kamar ?. (abaikan pengotor akseptor).

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | <p>Pernyataan <math>np = f(T)</math> menunjukkan bahwa pada temperatur definit dan semikonduktor tak terdegenerasi, perkalian konsentrasi pembawa pada kesetimbangan thermal tak bergantung pada keadaan pengotor (impurity) yang diberikan. Untuk semikonduktor intrinsik dimana <math>np = n_i</math>, maka konduktivitas dinyatakan sebagai :</p> $\sigma_i = en_i(\mu_e + \mu_h) \cong 2en_i\mu_e$ | 0 - 5  |
| 2  | <p>donor As adalah pentavalent, sementara akseptor Si adalah tetravalent, jadi setiap atom donor akan memberikan satu elektron bebas pada temperatur kamar, jadi <math>n \cong N_D</math> dengan mengabaikan efek pengotor akseptor, maka konduktivitas bahwa :</p>  | 0 - 10 |

|                    |  |               |
|--------------------|--|---------------|
|                    | $\sigma = e\mu_e N_D$  |               |
| 3                  | jadi :<br>$\frac{\sigma}{\sigma_i} = \frac{N_D}{2n_i} = 10^4 \rightarrow N_D = 2 \times 10^4 n_i$  | 0 - 5         |
| 4                  | gunakan hubungan :<br>$n_i = \sqrt{f(T)} = 2(m_e m_h)^{3/4} \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/k_B T}$<br>$= 2(0.2 \times 0.3)^{3/4} \left( \frac{k_B T m c^2}{2\pi\hbar^2 c^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/k_B T}$<br>dimana :<br>$k_B T \cong 1/40 \text{ eV}$ (pada suhu kamar)<br>$E_g = 1.14 \text{ eV}$ (untuk Si)<br>$mc^2 = 0.511 \text{ MeV}$<br>$c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$<br>$\hbar = 6.582 \times 10^{-16} \text{ eVs}$ | 0 - 20        |
| 5                  | jadi :<br>$n_i = \sqrt{f(T)} = 2(m_e m_h)^{3/4} \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_g/k_B T}$<br>$= 2(0.2 \times 0.3)^{3/4} \left( \frac{0.511 \times 10^6}{80\pi} \right)^{3/2} \left( \frac{1}{6.58 \times 10^{-16} \times 3 \times 10^8} \right) e^{-22.8}$<br>$= 3.62 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$  | 0 - 5         |
| 6                  | maka akan diperoleh :<br>$N_D = 7.2 \times 10^8 \text{ m}^{-3}$  | 0 - 5         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 50</b> |

**Soal ke 4:**

Dalam semikonduktor tipe-n, hubungan  $E$  terhadap  $k$  untuk elektron dalam pita konduksi dinyatakan sebagai :

$$E = ak^2 + C \quad ; C \text{ konstanta}$$

resonansi siklotron untuk elektron dalam medan magnet  $B = 0.1 \text{ Wb} / \text{m}^2$  terjadi frekuensi angular  $\omega_c = 1.8 \times 10^{11} \text{ rads}^{-1}$ .

a. Tentukan nilai  $a$

| No | Komponen Penilaian                                    | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Massa efektif dalam pita konduksi dinyatakan dengan : | 0 - 20 |

|                    |  |               |
|--------------------|--|---------------|
|                    | $\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k^2}$  |               |
| 2                  | <p>tinjau persamaan :</p> $E = ak^2 + C \quad ; \quad \frac{\partial E}{\partial k} = 2ak \quad ; \quad \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} = 2a$ <p>maka :</p> $\frac{1}{m^*} = \frac{2a}{\hbar^2}$   | 0 - 30        |
| 3                  | <p>frekuensi resonansi siklotron untuk elektron :</p> $\omega_c = \frac{eB}{m^*} \rightarrow \rightarrow \omega_c = \frac{2aeB}{\hbar^2}$ <p>maka :</p> $a = \frac{\hbar^2 \omega_c}{2 eB} = \frac{(1.05 \times 10^{-34})^2 (1.8 \times 10^{11})}{2(1.6 \times 10^{-19})(0.1)} = 6.2 \times 10^{-38} \text{ Jm}^2$ | 0 - 30        |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 80</b> |

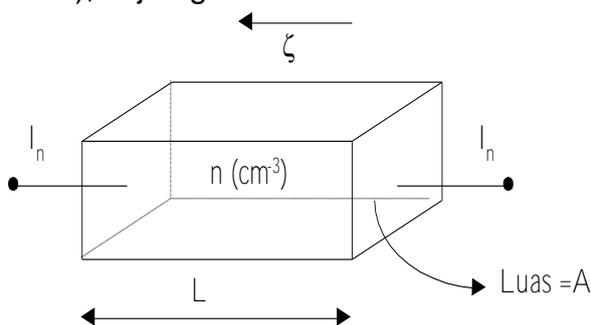
- b. Dengan mengasumsikan bahwa semikonduktor didoping dengan donor pentavalent. Perkirakan jumlah donor per  $m^3$  diberikan koefisien Hall pada suhu kamar  $R_H = 6.25 \times 10^{-6} m^3 C^{-1}$

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor          |
|--------------------|--|---------------|
| 1                  | <p>Untuk semikonduktor tipe-n berlaku <math>n \gg p</math>, maka :</p> $R_H \cong -\frac{1}{ne}$                 | 0 - 10        |
| 2                  | pada temperatur kamar, atom pengotor selalu berada dalam keadaan terionisasi, sehingga jumlah kerapatan pengotor | 0 - 10        |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 20</b> |

**Soal ke 5:**

Sebuah semikonduktor didoping dengan ketidamurnian Fospor sebanyak  $10^{16}$  atom/cm<sup>3</sup> sehingga dihasilkan semikonduktor tipe-n. Turunkan pernyataan untuk menyatakan resistivitas semikonduktor tipe-n tersebut dan berapa besar resistivitas bahan tersebut pada suhu kamar !

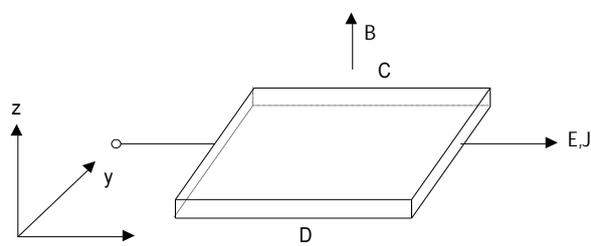
| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Dalam medan listrik $\vec{\xi}$ elektron akan bergerak dan gaya eksternal yang timbul : | 0 - 10 |

|   |  |        |
|---|--|--------|
|   | $\vec{F} = -e\vec{\xi} = -(\text{Gradien energi potensial elektron})$ <p>jika menyatakan hubungan :</p> $\vec{\xi} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$  |        |
| 2 | <p>ambil bahwa <math>\psi</math> potensial elektrostatik dengan gradien negatif sama dengan medan listrik :</p> $\vec{\xi} \equiv -\frac{d\psi}{dx}$ <p>sehingga diperoleh :</p> $\psi = -\frac{E_i}{q}$ <p>yang menunjukkan hubungan antara potensial elektrostatik dengan energi potensial elektron.</p>   | 0 - 10 |
| 3 | <p>Asumsikan bahwa semikonduktor adalah homogen, maka energi potensial <math>E_i</math> menurun secara linear terhadap jarak, dalam hal ini medan listrik konstan dalam arah x negatif. Transport pembawa dibawah pengaruh medan listrik akan menghasilkan arus yang disebut arus hanyut (drift current), tinjau gambar di bawah ini :</p>  <p>merupakan sampel dengan luas penampang <math>A</math>, panjang <math>L</math> dan konsentrasi pembawa <math>n</math>.</p> | 0 - 25 |
| 4 | <p>Jika sampel diberikan medan listrik <math>\vec{\xi}</math>, maka rapat arus elektron <math>\vec{J}_n</math> akan mengalir dalam sampel yang dinyatakan sebagai :</p> $\vec{J}_n = \frac{I_n}{A} = \sum_{i=0}^N (-qv_i)$ $= -qn\vec{v}_n = qn\mu_n\vec{\xi}$ <p>dimana <math>I_n</math> arus elektron.</p>   | 0 - 10 |
| 5 | <p>Dengan cara yang sama, maka rapat arus untuk hole dinyatakan sebagai :</p> $\vec{J}_p = qp\vec{v}_p = qp\mu_p\vec{\xi}$   | 0 - 5  |
| 6 | <p>total arus yang mengalir dalam semikonduktor akibat pengaruh medan listrik merupakan jumlah arus elektron dan hole :</p>  | 0 - 10 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = (qn\mu_n + qp\mu_p)\vec{E}$ <p>dimana suku dalam tanda ( ) merupakan suku konduktivitas :</p> $\sigma = (qn\mu_n + qp\mu_p)$  |                |
| 7                  | <p>hubungan antara resistivitas dengan konduktivitas merupakan hubungan terbalik dinyatakan sebagai :</p> $\rho = \frac{1}{\sigma}$ <p>sehingga :</p> $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{(qn\mu_n + qp\mu_p)}$  | 0 - 10         |
| 8                  | <p>untuk semikonduktor tipe-n :</p> $\rho_n = \frac{1}{\sigma_n} = \frac{1}{(qn\mu_n)}$ <p>dengan <math>\mu_n</math> menyatakan mobilitas elektron.</p>  | 0 - 10         |
| 9                  | <p>Dengan mengasumsikan bahwa pada suhu kamar, semua donor terionisasi sempurna, maka :</p> $n \cong N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ <p>mobilitas elektron <math>\mu_n</math> untuk Si 1350 cm<sup>2</sup>/V.s, maka :</p> $\rho = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(10^{16})(1350)} \cong 0.46 \Omega \text{ cm}$ | 0 - 10         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 6:**

Turunkan pernyataan untuk koefisien Hall bagi semikonduktor intrinsik dalam bentuk mobilitas elektron dan hole, serta kerapatan pembawa muatan ?

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | <p>Tinjau gambar dibawah ini :</p>  <p>Bidang merupakan sampel semikonduktor intrinsik yang terletak dalam bidang xy. Semikonduktor intrinsik dimasukkan dalam sistem dibawah pengaruh medan listrik <math>\vec{E}_x</math> dan medan magnet <math>\vec{B}_z</math>.</p> | 0 - 15 |

|   |  |        |
|---|--|--------|
| 2 | <p>Akibat pengaruh medan listrik ini menyebabkan elektron bergerak dalam arah sumbu x negatif dan hole bergerak ke arah sumbu x positif (sesuai arah medan listrik). Medan magnet menyebabkan elektron dan hole akan menyimpang dalam arah sumbu y negatif, karena timbul gaya Lorentz <math>q\vec{v}_x\vec{B}</math> ke arah D, elektron dan hole keduanya saling meniadakan yang timbul akibat adanya akumulasi muatan total di sisi D, karena proses saling meniadakan yang tidak sempurna yang sama dengan sisi C, tetapi berlawanan tanda. Hal ini akan menghasilkan medan listrik yaitu medan Hall dalam arah y.</p> | 0 - 15 |
| 3 | <p>Jika konduktivitas listrik semikonduktor dinyatakan sebagai :</p> $\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$ <p>dengan <math>n, p</math> masing-masing konsentrasi elektron dan hole, serta <math>\mu_n, \mu_p</math> adalah mobilitas pembawa yang didefinisikan sebagai kecepatan persatuan kuat medan yang searah dengan medan tersebut.</p>   | 0 - 15 |
| 4 | <p>Untuk keadaan tunak (<i>steady state</i>) tidak terdapat arus dalam arah y, akan tetapi arus hole dan elektron secara individu tidak nol. Dengan mendefinisikan <math>(J_p)_y</math> dan <math>(J_n)_y</math> sebagai rapat arus hole dan elektron, maka :</p> $(J_p)_y = pq\mu_p \epsilon_y - pq\mu_p (v_p)_x B_z$ $= pq\mu_p \epsilon_y - pq\mu_p^2 E_x B_z$ $(J_n)_y = nq\mu_n \epsilon_y - nq\mu_n (v_n)_x B_z$ $= nq\mu_n \epsilon_y + nq\mu_n^2 E_x B_z$  | 0 - 20 |
| 5 | <p>dalam keadaan tunak :</p> $J_y = (J_p)_y + (J_n)_y = 0$ <p>sehingga :</p> $\epsilon_y = \left( \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{p\mu_p + n\mu_n} \right) E_x B_z$   | 0 - 15 |
| 6 | <p>koefisien Hall didefinisikan sebagai :</p> $\text{Koefisien Hall} = \frac{\epsilon_y}{J_x B_x}$ <p>maka :</p> $R_H = \frac{1}{q} \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)}{(p\mu_p + n\mu_n)^2}$   | 0 - 10 |
| 7 | <p>oleh karena :</p> $J_x = \sigma E_x$  | 0 - 10 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | maka untuk semikonduktor intrinsik akan berlaku : $n = p$ , akan diperoleh : |                |
|                    | $R_H = \frac{1}{qn} \frac{(p\mu_p - n\mu_n)}{(p\mu_p + n\mu_n)}$             |                |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 7:**

Germanium (Ge) merupakan semikonduktor intrinsik dengan rapat muatan  $2.4 \times 10^{19}$  muatan per  $m^3$  pada temperatur 300 K. Bahan tersebut akan dibuat jenis semikonduktor ekstrinsik dengan menambahkan ketidakmurnian p Indium pada laju atom Indium sekitar  $4 \times 10^8$  per atom Germanium. Jika terdapat sekitar  $4.4 \times 10^{28}$  atom Germanium per  $m^3$ , maka tentukan konsentrasi pembawa muatan minoritasnya dan bahas hasilnya!

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | Untuk bahan semikonduktor tipe-p diperoleh bahwa pembawa muatan negatif ( $N_D$ ) sama dengan nol, sehingga pembawa muatan positif ( $N_A$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:<br>$N_A = \frac{4.4 \times 10^{28}}{4 \times 10^8} = 1.10 \times 10^{20} \text{ per } m^3$ $n_i^2 = n_p p_p = 5.76 \times 10^{38}$ | 0 - 30         |
| 2                  | Pembawa muatan mayoritas:<br>$p_p \cong N_A + \frac{n_i^2}{N_A} = 1.10 \times 10^{20} + \frac{5.76 \times 10^{38}}{1.10 \times 10^{20}} = 1.15 \times 10^{20} = N_A$   | 0 - 25         |
| 3                  | Pembawa muatan minoritas:<br>$n_p \cong \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{5.76 \times 10^{38}}{1.10 \times 10^{20}} = 5.24 \times 10^{18}$ sehingga:<br>$\frac{n_i}{n_p} \cong \frac{2.4 \times 10^{19}}{5.24 \times 10^{18}} \cong 5$   | 0 - 25         |
| 4                  | Sehingga jumlah konsentrasi pembawa muatan mayoritas ( $n_p$ ) sekitar seper lima kali pembawa muatan intrinsiknya ( $n_i$ ), dengan demikian konsentrasi pembawa muatan minoritas berkurang sekitar seper lima kali nilai intrinsiknya.   | 0 - 20         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**10. KK/ Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan**

**Soal ke 1:**

Jelaskan klasifikasi bahan magnetik berdasarkan harga suseptibilitas magnetik ( $\chi = M/B$ ) dan sebutkan beberapa contohnya !

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | Bahan magnetik berdasarkan harga suseptibilitas magnetik ( $\chi = M/B$ ) terbagi atas :<br>a. Bahan paramagnetik : Bahan dengan harga $\chi$ positif (dimana $M$ paralel terhadap $B$ ), dengan kulit atom terisi sebagian.<br>Contoh: Al ( $\chi = +2.2 \times 10^{-5}$ ), Mn ( $\chi = +98 \times 10^{-5}$ ), W ( $\chi = +36 \times 10^{-5}$ ). | 0 - 40         |
| 2                  | 0 Bahan diamagnetik : Bahan dengan harga $\chi$ negatif (dimana $M$ berlawanan terhadap $B$ ), dengan kulit atom terisi penuh.<br>Contoh: Cu ( $\chi = -1.0 \times 10^{-5}$ ), Au ( $\chi = -3.6 \times 10^{-5}$ ), air ( $\chi = -9.0 \times 10^{-5}$ ).   | 0 - 30         |
| 3                  | 1 Bahan feromagnetik : Bahan dengan harga $\chi$ besar ( $\cong 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ), sehingga bahan ini akan termagnetisasi secara spontan. Contoh : Fe, Co, dan Ni   | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 2:**

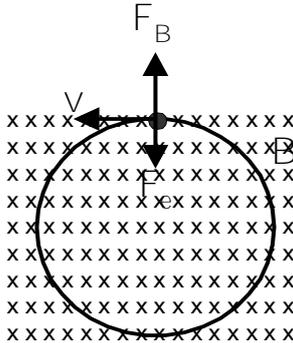
Jika kristal besi termagnetisasi total secara spontan, perkirakan hasil magnetisasi tersebut dengan menggunakan nilai-nilai yang sesuai :  
 $\rho_{\text{besi}} = 7.9$  (berat spesifik), berat atom besi ( $A$ ) = 56 dan bilangan Avogadro ( $N_A$ ) =  $6.02 \times 10^{23}$  !.

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Jumlah atom per satuan volume pada kristal besi :<br>$n = \frac{\rho N_A}{A} = \frac{7.9}{56} \times (6.02 \times 10^{23}) = 8.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} = 8.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$<br>momen magnetik tiap atom besi adalah sekitar $\mu_o = 2.2 \mu_B$ , dengan $\mu_B$ magneton Bohr | 0 - 50 |
| 2  | sehingga momen magnetik per satuan volume atau magnetisasi menjadi :  | 0 - 50 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $M \approx n\mu_o = 2.2n\mu_B = (2.2)(8.5 \times 10^{28})(9.3 \times 10^{-24})$ $= 1.74 \times 10^6 \text{ Am}^{-1}$ |                |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

Sebuah elektron bersirkulasi dalam medan magnetik dengan  $B = 2.0T$  yang bekerja secara tegak lurus pada bidang lintasan. Hitunglah perubahan momen magnetiknya !.

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Besarnya momen magnetik $\mu$ (ambil untuk $N = 1$ ) :<br>$\mu = NiA = (1)(e v)(\pi r^2) = \left(\frac{e\omega}{2\pi}\right)(\pi r^2) = \frac{1}{2} e r^2 \omega$   | 0 - 10 |
| 2  | perubahan momen magnetik $\Delta\mu$ :<br>$\Delta\mu = \frac{1}{2} e r^2 \Delta\omega$  | 0 - 10 |
| 3  | untuk mencari besaran $\Delta\omega$ , tinjau gambar di bawah ini :<br>  | 0 - 10 |
| 4  | besarnya gaya yang bekerja pada elektron dalam medan magnetik:<br>$F_e = -e(v \times B)$  | 0 - 10 |
| 5  | besarnya gaya magnetik yang bekerja selalu tegak lurus dalam arah gerakan :<br>$F_B = evB = e\omega_o r B$  | 0 - 10 |
| 6  | gaya resultan yang timbul pada elektron yang bersirkulasi dalam medan magnetik :<br>$F_e \pm F_B = m\omega^2 r$ $m\omega_o^2 \pm e\omega r B = m\omega^2 r$ $\omega_o^2 \pm \left(\frac{eB}{m}\right)\omega r - \omega^2 r = 0$ | 0 - 15 |
| 7  | dari kenyataan bahwa $\omega$ hanya berbeda sedikit dari $\omega_o$ , sehingga:   | 0 - 10 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $\omega = \omega_o + \Delta\omega$ <p>dalam hal ini, <math>\Delta\omega \ll \omega_o</math>, sehingga persamaan *) menjadi :</p> $(\omega_o^2 + 2\omega_o\Delta\omega - (\Delta\omega)^2) \mp (\beta\omega_o + \beta\Delta\omega) - \omega_o^2 = 0$  |                |
| 8                  | <p>dimana suku-suku <math>(\Delta\omega)^2</math> dan <math>\beta\Delta\omega</math> sangat kecil dibandingkan suku-suku lain, maka :</p> $\Delta\omega \equiv \mp \frac{1}{2}\beta = \pm \frac{eB}{2m}$   | 0 - 10         |
| 9                  | <p>sehingga perubahan momen magnetik <math>\Delta\mu</math> :</p> $\Delta\mu = \pm \frac{1}{2}er^2 \left( \frac{eB}{2m} \right) = \pm \frac{e^2 Br^2}{4m}$ $= \pm \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 (2.0)(5.3 \times 10^{-11})^2}{(4)(9.1 \times 10^{-31})} = \pm 4.0 \times 10^{-29} \text{ A.m}^2$ | 0 - 15         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 4:**

Tinjau gas elektron konduksi pada suhu nol mutlak dalam medan magnetik lemah  $B$ . Jika konsentrasi spin up  $N_+$  dan spin down  $N_-$  elektron dapat diparameterisasi oleh kuantitas  $x$ , maka :

$$N_+ = \frac{1}{2}N(1+x), \quad N_- = \frac{1}{2}N(1-x)$$

dimana  $N$  jumlah total elektron. Buktikanlah bahwa suseptibilitas magnetik  $\chi = M/B$  dapat dinyatakan sebagai :

$$\chi = \frac{3n\mu_B^2}{2E_F}$$

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | <p>Energi elektron konduksi dinyatakan sebagai :</p> $\epsilon = \frac{p^2}{2m} \pm \mu B$ <p>dimana <math>\epsilon = \frac{p^2}{2m}</math> energi kinetik elektron, <math>\mu</math> momen magnetik, sedangkan tanda (+) dan (-) mencirikan spin paralel dan anti paralel terhadap <math>B</math>.</p> | 0 - 10 |
| 2  | <p>Rapat keadaan elektron konduksi dinyatakan sebagai :</p> $\rho(E) = C\sqrt{E}dE$ <p>dimana <math>C</math> adalah konstanta dan kerapatan elektron dengan momen magnetik paralel dan anti paralel terhadap <math>B</math> dinyatakan :</p>  | 0 - 10 |

|   |   |        |
|---|---|--------|
|   | $N_+ = C \int_0^{E_+} \rho(E) dE, \quad N_- = C \int_0^{E_-} \rho(E) dE$  |        |
| 3 | <p>pada suhu nol mutlak, semua keadaan di bawah energi tertentu <math>\epsilon_o</math> terisi elektron dalam arah kedua spin :</p> $\epsilon_o = E_+ - \mu B = E_- + \mu B$ <p>dimana :</p> $E_+ = \epsilon_o + \mu B$ $E_- = \epsilon_o - \mu B$  | 0 - 10 |
| 4 | <p>sehingga :</p> $N_+ \equiv \frac{1}{2} N(1+x) = C \int_0^{\epsilon_o + \mu B} E^{1/2} dE = \frac{2}{3} C(\epsilon_o + \mu B)^{3/2}$ $N_- \equiv \frac{1}{2} N(1-x) = C \int_0^{\epsilon_o - \mu B} E^{1/2} dE = \frac{2}{3} C(\epsilon_o - \mu B)^{3/2}$   | 0 - 10 |
| 5 | <p>andaikan <math>E_F</math> adalah energi Fermi dengan ketidakhadiran medan magnetik, maka akan didapatkan :</p> $N = 2C \int_0^{E_F} E^{1/2} dE = \frac{4}{3} C E_F^{3/2}$ <p>yang memberikan <math>C = \frac{3}{4} N E_F^{-3/2}</math>, sehingga :</p> $\epsilon_o + \mu B = E_F (1+x)^{2/3}$ $\epsilon_o - \mu B = E_F (1-x)^{2/3}$   | 0 - 10 |
| 6 | <p>untuk <math>x \ll 1</math>, diperoleh :</p> $x \approx \frac{3\mu B}{2E_F}$  | 0 - 10 |
| 7 | <p>Energi total elektron dengan spin up dan spin down :</p> $E_{+total} = C \int_0^{\epsilon_o + \mu B} (E - \mu B) E^{1/2} dE$ $= \frac{2}{5} C(\epsilon_o + \mu B)^{5/2} - \mu B N_+$ $= \frac{2}{5} C E_F^{2/5} (1+x)^{5/3} - \frac{1}{2} \mu B N (1+x)$ $= \frac{3}{10} E_F N (1+x)^{5/3} - \frac{1}{2} \mu B N (1+x)$ $E_{-total} = C \int_0^{\epsilon_o - \mu B} (E + \mu B) E^{1/2} dE$ $= \frac{2}{5} C(\epsilon_o - \mu B)^{5/2} + \mu B N_-$ $= \frac{3}{10} E_F N (1-x)^{5/3} + \frac{1}{2} \mu B N (1-x)$ | 0 - 15 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
| 8                  | <p>sehingga energi total dari gas elektron konduksi :</p> $E_{total} = \frac{3}{10} NE_F \left[ (1+x)^{5/3} + (1-x)^{5/3} \right] - \mu BNx$ $\cong \frac{3}{5} NE_F - \mu BNx$ $\approx \frac{3}{5} NE_F - \frac{2\mu^2 B^2}{2E_F} N$   | 0 - 10         |
| 9                  | <p>untuk medan lemah dijustifikasi dengan mengambil <math>\mu B \ll E_F</math> atau <math>x \ll 1</math>. Pada saat momen magnetik meningkat dari spin elektron <math>\mu = \mu_B</math> (magneton Bohr), maka momen magnetik totalnya menjadi <math>VM</math>, dimana <math>M</math> magnetisasi dan <math>V</math> volume gas elektron. Selanjutnya :</p> $VM = (N_+ - N_-)\mu_B = Nx\mu_B$ $M = nx\mu_B = \frac{3n\mu_B^2 B}{2E_F}$ | 0 - 10         |
| 10                 | <p>suseptibilitas magnetik <math>\chi</math> :</p> $\chi = \frac{M}{B} = \frac{3n\mu_B^2 B}{2E_F}$   | 0 - 5          |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 5:**

Apa yang dimaksud dengan harga jenuh spesifik untuk kerapatan magnetisasi dari besi/baja (satuan keadaan)?. Dari harga ini dan harga spesifik lainnya, perkirakan momen magnetik spin intrinsik elektron untuk keadaan feromagnetisme !.

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | <p>Pada pemakaian medan magnetik, magnetisasi besi akan meningkat dengan intensitas medan, jika medan meningkat pada harga tertentu magnetisasi tidak akan meningkat lagi selanjutnya, tapi mencapai harga jenuh pada harga <math>M_s</math> pada waktu tertentu. Berdasarkan teori feromagnetisme, semua momen magnetik akibat spin elektron akan disejajarkan sepanjang arah medan magnetik. Misalkan jumlah kerapatan elektron dalam bahan feromagnetik adalah <math>n</math> dan momen magnetik akibat spin elektron adalah <math>\mu</math>, maka :</p> $M_s = n\mu$ | 0 - 50 |
| 2  | <p>magnetisasi jenuh spesifik dari besi, <math>M_s = 10^6 Am^{-1}</math> dan <math>n = 3 \times 10^{28} m^{-3}</math>, serta momen magnetik spin intrinsik elektron adalah</p>  | 0 - 50 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $\mu = \frac{M_s}{n} \cong \frac{10^6}{3 \times 10^{28}} = 3 \times 10^{-23} \text{ Am}^2$ |                |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

### 11. KK/ Sub CPMK: Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik

#### Soal ke 1:

Buktikan bahwa konstanta dielektrik sebagai fungsi  $\omega$  untuk elektron bebas gas dengan kerapatan  $n$  dinyatakan sebagai :

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

dengan :  $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$

Jika volume sel satuan primitif logam Na  $35 \times 10^{-30} \text{ m}^3$ , hitunglah panjang gelombang pancung (cuttof) logam Na tersebut!.

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | <p>Jika diberikan medan listrik yang sejajar arah sumbu x :</p> $\vec{E} = \vec{E}_o e^{i\omega t}$ <p>perpindahan elektron dari posisi netralnya diberikan sebagai :</p> $m \frac{d^2 x}{dt^2} + eE_o e^{i\omega t} = 0$  | 0 - 10 |
| 2  | <p>ambil bahwa solusi yang memenuhi persamaan diferensial diatas :</p> $x = x_o e^{i\omega t}$ <p>dengan <math>x_o = \frac{eE_o}{m\omega^2}</math></p>   | 0 - 10 |
| 3  | <p>Momen dipol per satuan volume atau pengutuban dari elektron gas :</p> $P = nex = -\frac{ne^2}{m\omega^2} E_o e^{i\omega t}$ $= -\frac{ne^2}{m\omega^2} E$   | 0 - 10 |
| 4  | <p>konstanta dielektrik relatif <math>\varepsilon</math> dinyatakan dengan :</p> $\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_o E} = \frac{\varepsilon_o E + P}{\varepsilon_o E} = 1 - \frac{ne^2}{\varepsilon_o m \omega^2}$ $\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$ | 0 - 20 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | dengan $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}}$ frekuensi angular plasma.   |                |
| 5                  | Atom Na mempunyai valensi satu dan setiap atom menyumbang satu elektron konduksi, dalam tiap sel satuan primitif mengandung satu atom, sehinggakan kerapatan elektron konduksi :<br>$n = \frac{1}{35 \times 10^{-30}} = 2.86 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$            | 0 - 10         |
| 6                  | dengan menggunakan persamaan :<br>$\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m} = 4\pi c^2 \left( \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 m c^2} \right)$<br>$\omega_p^2 = 4\pi (3 \times 10^8)^2 (2.86 \times 10^{28}) (2.82 \times 10^{-15})$<br>$= 9.12 \times 10^{31} \text{ s}^{-2}$ | 0 - 20         |
| 7                  | frekuensi angular pancung (cuttof) :<br>$\omega = \omega_p = 9.55 \times 10^{15}$  | 0 - 10         |
| 8                  | sehingga panjang gelombang cutoff menjadi :<br>$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ m} = 2000 \text{ \AA}$   | 0 - 10         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 2:**

Tentukan persentasi polarisabilitas ionik dari kristal NaCl dengan indeks bias optik dan konstanta dielektrik masing-masing 1.5 dan 5.6!.

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Gunakan persamaan Clausius-Mossotti:<br>$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N(\alpha_e + \alpha_i)}{3\epsilon_0}$<br>Dimana $\alpha_e$ dan $\alpha_i$ menyatakan kontribusi elektronik dan ionik pada polarisabilitas.                 | 0 - 30 |
| 2  | Pada frekuensi optik berlaku:<br>$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{N\alpha_e}{3\epsilon_0}$<br>dengan $n$ menyatakan indeks bias. Selanjutnya:<br>$\left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) (\epsilon_r + 2) = \frac{\alpha_e}{\alpha_e + \alpha_i}$ | 0 - 30 |
| 3  | dimana persamaan sebelah kanan menyatakan fraksi polarisabilitas elektronik. Sehingga prosentasi polarisabilitas elektronik dapat ditulis menjadi:  | 0 - 40 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $\left(\frac{\alpha_i}{\alpha_e + \alpha_i}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{\alpha_e}{\alpha_e + \alpha_i}\right) \times 100\%$ $\left(\frac{\alpha_i}{\alpha_e + \alpha_i}\right) \times 100\% = \left[1 - \frac{(n^2 - 1)(\epsilon_r + 2)}{(n^2 + 2)(\epsilon_r - 1)}\right] \times 100\%$ $\left(\frac{\alpha_i}{\alpha_e + \alpha_i}\right) \times 100\% = \left[1 - \frac{(1.5^2 - 1)(5.6 + 2)}{(1.5^2 + 2)(5.6 - 1)}\right] \times 100\% = 51.4\%$ |                |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 3:**

Asumsikan bahwa terdapat sekitar  $10^{27}$  molekul HCl/m<sup>3</sup>, maka tentukan orientasi polarisasi pada temperatur ruang jika HCl ini berada di bawah pengaruh medan listrik sebesar  $10^6$  V/m. Momen dipol molekul HCl sekitar  $3.46 \times 10^{-30}$  C-m. Tunjukkan bahwa pada temperatur dan medan tinggi ini, nilai  $a$  ( $=pE/kT$ ) sangat kecil.

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | Diberikan $N = 10^{27}$ molekul HCl/m <sup>3</sup> , $E = 10^6$ V/m, $p = 3.46 \times 10^{-30}$ C-m. Orientasi polarisabilitas (dipolar) diberikan oleh persamaan:<br>$\alpha_d = \frac{p^2}{3kT} = \frac{(3.46 \times 10^{-30})^2}{(3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300)} = 9.64 \times 10^{-40} \text{ Fm}^2$ Sehingga orientasi polarisasi menjadi:<br>$P = np = N\alpha_d E = 10^{27} \times (9.64 \times 10^{-40}) \times 10^6 = 9.64 \times 10^{-7} \text{ Cm}^2$ | 0 - 30         |
| 2                  | Energi magnetik:<br>Energi magnetik = $pE = 3.46 \times 10^{-30} \times 10^6 = 3.46 \times 10^{-24}$ J   | 0 - 30         |
| 3                  | Energi termal:<br>Energi termal = $kT = 1.38 \times 10^{-23} \times 300 = 4.04 \times 10^{-21}$ J  | 0 - 30         |
| 4                  | Maka bandingkan kedua energi ini untuk mendapatkan nilai $a$ :<br>$a = \frac{.46 \times 10^{-24}}{4.04 \times 10^{-21}} = 10^{-3}$   | 0 - 10         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 4:**

Jelaskan fenomena polarisasi alamiah dari bahan ferroelektrik!

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Bahan ferroelektrik adalah bahan yang menunjukkan suatu polarisasi permanen tanpa adanya medan listrik eksternal, sifat ini menunjukkan kecenderungan alamiah dari kutub-kutub permanen molekul-molekulnya untuk saling mensejajarkan diri yang mungkin dihasilkan | 0 - 40 |

|                    |   |                |
|--------------------|---|----------------|
|                    | <p>oleh interaksi antar molekul yang akan menimbulkan medan lokal yang kuat yang membantu kesejajarannya. Besarnya polarisasi jika medan eksternal tidak ada, dinyatakan sebagai :</p> $E_m = \frac{1}{3\epsilon_o} P_o$ <p>dalam hal ini jika terjadi polarisasi <math>P_o</math>, maka akan timbul medan listrik pada molekul <math>E_m</math> dengan kecenderungan mengutubkan molekul tersebut.</p>   |                |
| 2                  | <p>Jika terdapat <math>N</math> molekul per satuan volume, maka :</p> $P_o = N\alpha E_m = \frac{N\alpha}{3\epsilon_o} = 1$ <p>bahan yang memenuhi persamaan diatas dikatakan sebagai bahan ferroelektrik,</p>  | 0 - 30         |
| 3                  | <p>contoh bahan yang memiliki sifat ini diantaranya :</p> <p>Kelompok Garam-garam Rochelle: <math>\text{NaK}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot 4\text{H}_2\text{O}</math>,<br/> <math>\text{LiNH}_4((\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O})</math><br/>         Kelompok KDP (Potassium Dihydrogen Phosphate): <math>\text{KH}_2\text{PO}_4</math>,<br/> <math>\text{KD}_2\text{PO}_4</math>, <math>\text{RbH}_2\text{PO}_4</math><br/>         Kelompok Perovskites: <math>\text{BaTiO}_3</math>, <math>\text{SrTiO}_3</math>, <math>\text{WO}_3</math></p> | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 5:**

Buktikan bahwa konstanta dielektrik sebagai fungsi  $\omega$  untuk elektron bebas gas dengan kerapatan  $n$  dinyatakan sebagai :

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

dengan :  $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_o m}$

Jika volume sel satuan primitif logam Na  $35 \times 10^{-30} \text{ m}^3$ , hitunglah panjang gelombang pancung (cuttof) logam Na tersebut !.

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | <p>Jika diberikan medan listrik yang sejajar arah sumbu x :</p> $\vec{E} = \vec{E}_o e^{i\omega t}$                   | 0 - 10 |
| 2  | <p>perpindahan elektron dari posisi netralnya diberikan sebagai :</p> $m \frac{d^2 x}{dt^2} + eE_o e^{i\omega t} = 0$ | 0 - 10 |
| 3  | <p>ambil bahwa solusi yang memenuhi persamaan diferensial diatas :</p>  | 0 - 10 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | $x = x_0 e^{i\omega t}$ <p>dengan <math>x_0 = \frac{eE_0}{m\omega^2}</math></p>  |                |
| 4                  | <p>Momen dipol per satuan volume atau pengutuban dari elektron gas :</p> $P = nex = -\frac{ne^2}{m\omega^2} E_0 e^{i\omega t}$ $= -\frac{ne^2}{m\omega^2} E$   | 0 - 10         |
| 5                  | <p>konstanta dielektrik relatif <math>\epsilon</math> dinyatakan dengan :</p> $\epsilon = \frac{D}{\epsilon_0 E} = \frac{\epsilon_0 E + P}{\epsilon_0 E} = 1 - \frac{ne^2}{\epsilon_0 m \omega^2}$ $\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$ <p>dengan <math>\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}}</math> frekuensi angular plasma.</p> | 0 - 15         |
| 6                  | <p>Atom Na mempunyai valensi satu dan setiap atom menyumbang satu elektron konduksi, dalam tiap sel satuan primitif mengandung satu atom, sehingga kerapatan elektron konduksi :</p> $n = \frac{1}{35 \times 10^{-30}} = 2.86 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$   | 0 - 10         |
| 7                  | <p>dengan menggunakan persamaan :</p> $\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m} = 4\pi c^2 \left( \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 m c^2} \right)$ $\omega_p^2 = 4\pi (3 \times 10^8)^2 (2.86 \times 10^{28}) (2.82 \times 10^{-15})$ $= 9.12 \times 10^{31} \text{ s}^{-2}$   | 0 - 15         |
| 8                  | <p>frekuensi angular pancung (cuttof) :</p> $\omega = \omega_p = 9.55 \times 10^{15}$  | 0 - 10         |
| 9                  | <p>sehingga panjang gelombang cuttof menjadi :</p> $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ m} = 2000 \text{ \AA}$   | 0 - 10         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

## 12. KK/ Sub CPMK: Mahasiswa mampu mengklasifikasikan tentang konsep superkonduktivitas

### Soal ke 1:

Jelaskan perbedaan antara Superkonduktor tipe I dan superkonduktor tipe II.

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | <p><b>Superkonduktor tipe I</b></p> <p>a. Disebut <i>Soft</i> Superkonduktor</p> <p>b. Prinsip kerja berdasarkan efek Meissner</p> <p>c. Di bawah medan kritis <math>H_c</math> bersifat sebagai bahan diamagnetisme. Pada saat medan magnetik meningkat melebihi medan kritis <math>H_c</math> medan menembus bahan secara komplit dan selanjutnya specimen berubah ke keadaan normalnya.</p> <p>d. Terjadi lompatan tiba-tiba ke keadaan normal ketika medan magnet meningkat melebihi <math>H_c</math></p> <p>e. Nilai <math>H_c</math> sangat kecil sehingga aplikasinya sangat terbatas</p>                | 0 - 50         |
| 2                  | <p><b>Superkonduktor tipe II</b></p> <p>a. Disebut <i>hard</i> superkonduktor</p> <p>b. Prinsip kerja tidak berdasarkan efek Meissner</p> <p>c. Menunjukkan sifat diamagnetisme di atas medan kritis <math>H_{c1}</math> yang disebut medan magnetik terendah. Di antara <math>H_{c1}</math> dan <math>H_{c2}</math> spesimen berada dalam keadaan campuran. Dimana di atas <math>H_{c2}</math> spesimen adalah konduktor normal.</p> <p>d. Tidak terjadi lompatan tiba-tiba ketika medan magnetik meningkat</p> <p>e. Diperlukan medan magnetik yang relatif tinggi untuk mengubah sifat superkonduktornya</p> | 0 - 50         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

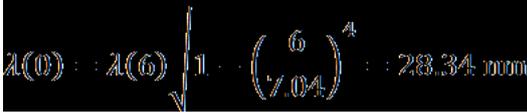
**Soal ke 2:**

Hitung kerapatan elektron superkonduktif Merkuri pada 3.5 K, jika diberikan temperatur transisi Merkuri 4.22 K.

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | <p>Rapat arus normal Merkuri dihitung berdasarkan berat molekul dan kerapatannya:</p> $n_0 = \frac{N\rho}{M} = \frac{(6.023 \times 10^{23})(13.55 \times 10^3)}{200.6} = 4.06 \times 10^{28} /m^3$ | 0 - 50         |
| 2                  | $n_s = n_0 \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^4 \right) = (4.06 \times 10^{28}) \left( 1 - \left( \frac{3.5}{4.22} \right)^4 \right) = 2.138 \times 10^{28} /m^3$                             | 0 - 50         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

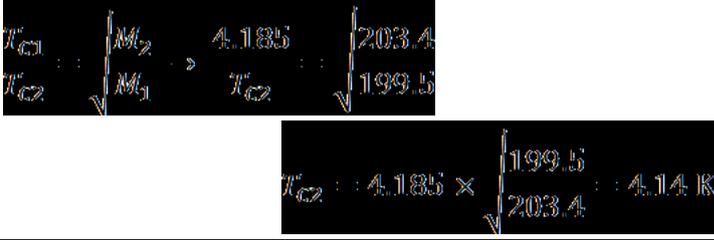
**Soal ke 3:**

Kedalaman penetrasi London untuk suatu sampel pada 6 K dan 7 K adalah 41.2 nm dan 183.0 nm. Hitung temperatur transisi selama kedalaman penetrasi pada 0 K.

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | <p>Diketahui <math>T_1 = 6</math> K, <math>T_2 = 7</math> K, <math>\lambda(T_1) = 41.2</math> nm, dan <math>\lambda(T_2) = 183.0</math> nm.<br/>Diketahui bahwa:</p> $\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4}}$   | 0 - 30         |
| 2                  | <p>Maka:</p> $\frac{\lambda(T_1)}{\lambda(T_2)} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{T_1}{T_c}\right)^4}}{\sqrt{1 - \left(\frac{T_2}{T_c}\right)^4}} = \sqrt{\frac{T_c^4 - T_2^4}{T_c^4 - T_1^4}}$ <p>atau</p>  $T_c^4 = \frac{44683.15}{18.15} = 2461.88$ <p><math>T_c = 7.04</math> K</p> | 0 - 40         |
| 3                  | <p>Temperatur transisi:</p> $\lambda(6) = \frac{\lambda(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{6}{T_c}\right)^4}}$   | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

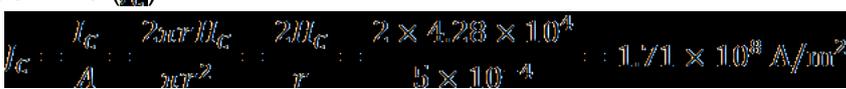
**Soal ke 4:**

Diketahui temperatur kritis  $T_c$  untuk Hg dengan massa isotop 199.5 adalah 4.185 K. Hitung temperatur kritisnya pada saat massa isotop berubah menjadi 203.4.

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | Diberikan $T_{C1} = 4.185$ K, $M_1 = 199.5$ , $M_2 = 203.4$ , maka $T_{C2}$ ?   | 0 - 40         |
| 2                  | Diketahui bahwa:<br>$T_C \sqrt{M} = \text{Konstan}$<br> | 0 - 60         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 5:**

Hitung rapat arus kritis untuk kawat dengan diameter 1 mm pada 4.2 K. Asumsikan bahwa intensitas medan magnetik kritis bergantung pada temperatur ( $T$ ). Diberikan  $T_C$  untuk timah 7.18 K dan  $H_C(0)$  adalah  $6.5 \times 10^4$  A/m.

| No                 | Komponen Penilaian  | Skor           |
|--------------------|---|----------------|
| 1                  | Diberikan $T = 4.2$ K, $T_C = 7.18$ K, $H_C(0) = 6.5 \times 10^4$ A/m, $d = 1$ mm ( $r = 0.5 \times 10^{-3}$ m), maka:<br>$H_C(T) = H_C(0) \left(1 - \frac{T^2}{T_C^2}\right) = 6.5 \times 10^4 \left(1 - \frac{4.2^2}{7.18^2}\right) = 4.28 \times 10^4 \text{ A/m}$ | 0 - 40         |
| 2                  | Arus kritis ( $I_C$ ):<br>   | 0 - 30         |
| 3                  | Rapat arus kritis ( $J_C$ ):<br>  | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

**13. KK/ Sub CPMK: Mahasiswa mampu memahami konsep Nano-Material**

**Soal ke 1:**

Gambarkan secara singkat dan jelas tentang struktur dan sifat-sifat partikel-nano.

| No | Komponen Penilaian   | Skor   |
|----|--|--------|
| 1  | Partikel-nano terbentuk dari kumpulan atom atau molekul dengan jumlah $10^6$ atau kurang yang terikat bersama dalam satu kluster dengan jari-jari sekitar 100 nm atau kurang. Beberapa struktur yang | 0 - 35 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | dikategorikan dalam partikel-nano, diantaranya metal nano-kluster, semikonduktor nano-kluster, dan dielektrik nano-partikel.   |                |
| 2                  | Sifat material berubah ketika ukuran mereka mendekati skala nano dan ketika persentase dari permukaan dalam hubungannya dengan persentase volume material menjadi signifikan. Untuk material ruah yang lebih besar dari satu <u>mikrometer</u> (atau mikron), persentase permukaan tidak signifikan dalam kaitannya dengan volume dalam sebagian besar materi. | 0 - 35         |
| 3                  | Oleh karena itu sifat yang menarik dan kadang-kadang tak terduga dari nanopartikel adalah sebagian besar disebabkan oleh luas permukaan yang besar pada material, yang mendominasi kontribusi yang diberikan oleh sebagian kecil dari materi   | 0 - 30         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 2:**

Jelaskan struktur dan sifat karbon nano-tube (CNT)

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Karbon nano-tube (CNT) adalah material yang terbentuk dari ikatan antar atom karbon, dimana satu atom karbon berikatan dengan tiga atom karbon lainnya. CNT merupakan jenis struktur supramolekul (molekul sangat besar) yang disebut sebagai allotrop. Beberapa struktur lain yang dibentuk oleh karbon, yaitu graphene, grafit, intan dan fullerene. Beberapa sifat CNT, diantaranya:<br>1. Sifat listrik: CNT terdiri dari kombinasi N dan M (perkiraan struktur parameter berapa banyak nano-tube yang menggulung), dimana sifat konduktivitasnya bergantung pada derajat penggulangan, dimana derajat penggulangan ini menentukan sifatnya sebagai logam, semikonduktor, dan isolator. | 0 - 20 |
| 2  | 2. Sifat mekanik: CNT memiliki massa jenis yang kecil, yaitu antara 1.3-1.4 g/cm <sup>3</sup> , dengan ikatan kimia dominan sp <sup>2</sup> mirip dengan graphene. Oleh karena ikatannya sangat kuat, CNT memiliki modulus elastis yang sangat besar dibandingkan material lainnya, sehingga diharapkan dapat menjadi bahan fiber yang sangat kuat.   | 0 - 15 |
| 3  | 3. Sifat termal: CNT merupakan konduktor panas yang baik dibandingkan material lain. Sifat konduktivitasnya disebabkan fenomena konduksi balistik sepanjang tabung. CNT stabil pada suhu lebih besar dari 2800 °C di dalam vakum dan 750 °C di udara.   | 0 - 15 |

|                    |   |                |
|--------------------|---|----------------|
| 4                  | 4. Sifat Optik: Sifat optik CNT akan berkurang dengan bertambahnya ukuran CNT, diantaranya lebar celah pita energi (band-gap) dipengaruhi oleh diameternya, dimana makin kecil diameternya, maka celah pita energinya makin besar.  | 0 - 15         |
| 5                  | 5. Sifat kimia: Sifat reaktivitas kimia dari CNT menyerupai lembaran graphene yang berpengaruh pada pembentukan (penggulungan) CNT. Makin kecil diameter CNT, maka sifat reaktifnya makin besar dan luas permukaan spesifiknya makin besar.   | 0 - 15         |
| 6                  | 6. Pengaruh cacat terhadap sifat CNT: Cacat dimaksud berupa kekosongan atom (vacancy) dapat mempengaruhi sifat suatu material. Nilai cacat yang tinggi dapat menurunkan daya regang CNT sampai 85%. Cacat juga secara keseluruhan mempengaruhi sifat listrik (penurunan konduktivitas), menyebabkan perubahan menjadi bahan semikonduktor, serta mempengaruhi sifat termal CNT dalam bentuk pengurangan konduktivitas termalnya | 0 - 20         |
| <b>Jumlah Skor</b> |   | <b>0 - 100</b> |

### Soal ke 3:

Jekaskan bagaimana Kuantum Dot (Quantum Dot) dihasilkan berdasarkan struktur, sifat-sifat karakteristik, dan aplikasinya.

| No | Komponen Penilaian  | Skor   |
|----|---|--------|
| 1  | Kuantum dot (QD) disebut juga dengan atom tambahan (artificial atom), hal ini disebabkan karena QD memiliki ukuran beberapa kali ukuran atom tunggal yang menyerupai sifat sebuah atom, yaitu didasarkan pada beberapa fenomena kuantum, seperti efek terobosan, rapat keadaan, dan tingkat-tingkat energi. QD merupakan material yang menyerap dan memancarkan cahaya secara efisien dan spesifik bergantung pada ukurannya, sehingga mempunyai peluang besar dalam aplikasi bidang optoelektronik (laser dan LED). Beberapa aplikasi dari QD yang sedang dan sudah dikembangkan, diantaranya: | 0 - 25 |
| 2  | 1. Transistor elektron tunggal: merupakan salah satu kandidat untuk devais non-volatile memory dan gerbang logika.  | 0 - 25 |
| 3  | 2. Sel surya: devais ini mampu mengubah sinar matahari menjadi energi listrik secara langsung. Untuk sel surya berbasis Si terdapat kendala dalam pemanfaatannya akibat efisiensi konversi yang dihasilkannya relatif rendah, sehingga pemanfaatan QD dengan ukuran dalam skala nanometer   | 0 - 25 |

|                    |  |                |
|--------------------|--|----------------|
|                    | akan menghasilkan luas permukaan serapan yang besar.   |                |
| 4                  | 3. Piranti memori: pemanfaatan QD untuk piranti memori berkecepatan tinggi memiliki peluang pengembangan yang sangat besar, hal ini dikarenakan kapasitas dan waktu simpan yang lama | 0 - 25         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

**Soal ke 4:**

Jelaskan prinsip kerja Atomic Force Microscopy (AFM)

| No                 | Komponen Penilaian   | Skor           |
|--------------------|--|----------------|
| 1                  | AFM merupakan mikroskop canggih dengan teknik pengoperasian yang sederhana.  | 0 - 25         |
| 2                  | Kelebihan AFM dibandingkan peralatan karakterisasi lainnya, yaitu tidak memerlukan vakum, tegangan tinggi maupun fasilitas pendingin, seperti halnya SEM dan TEM.  | 0 - 25         |
| 3                  | Prinsip kerja AFM didasarkan pada cantilever beserta tip digerakan sepanjang permukaan benda yang diamati, dimana tekstur permukaan benda yang tidak rata, maka selama menggerakkan tip, sudut kemiringan cantilever berubah-ubah. Perubahan ini memberikan informasi kedalaman tekstur permukaan benda. | 0 - 25         |
| 4                  | Sudut yang dibentuk oleh cantilever ditentukan dengan mengarahkan berkas tipis sinar laser kearah cantilever. Perubahan sudut cantilever menyebabkan arah sinar pantul sehingga kedalaman tekstur benda dapat diketahui.   | 0 - 25         |
| <b>Jumlah Skor</b> |  | <b>0 - 100</b> |

### 3. RANCANGAN EVALUASI PROGRAM PEMBELAJARAN

#### 1. PROGRAM EVALUASI PEMBELAJARAN

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Perguruan Tinggi      | : Universitas Mulawarman   |
| Fakultas              | : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam                    |
| Program Studi         | : Fisika   |
| Mata Kuliah           | : Fisika Zat Padat   |
| Kode Mata Kuliah      | : 190704603W034  |
| Semester/sks          | : VI (Enam) / 3 SKS  |
| Mata Kuliah Prasyarat | : Fisika Kuantum, Fisika Modern, Listrik Magnet                    |
| Nama Dosen            | : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si<br>Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si |

#### 2. TUJUAN EVALUASI PROGRAM PEMBELAJARAN

Evaluasi program pembelajaran bertujuan untuk:

- Mengumpulkan data atau informasi dari responden (mahasiswa) terkait dengan kompetensi pedagogik dosen;
- Mengumpulkan data atau informasi dari responden (mahasiswa) terkait dengan kompetensi Profesional dosen;
- Mengumpulkan data atau informasi dari responden (mahasiswa) terkait dengan kompetensi Kepribadian dosen;
- Mengumpulkan data atau informasi dari responden (mahasiswa) terkait dengan kompetensi sosial dosen;
- Mengumpulkan data atau informasi oleh dosen dengan terkait kebiasaan belajar mahasiswa dalam perkuliahan

Sehingga tercipta proses pembelajaran yang baik dan efektif dalam mata kuliah Fisika Zat Padat.

Informasi terkait dengan kompetensi dosen yang meliputi kompetensi pedagogik, Profesional, Kepribadian, dan Kompetensi sosial dosen dan informasi terkait kebiasaan belajar mahasiswa dalam perkuliahan, maka dibuat rencana evaluasi seperti dalam tabel berikut:

**Tabel Rencana Evaluasi**

| No | Informasi yang dibutuhkan  | Indikator   |
|----|--|---|
| 1  | Pendapat mahasiswa terhadap kompetensi dosen terkait dengan kompetensi pedagogik | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kesiapan memberikan kuliah</li> <li>2. Kelengkapan atribut mata kuliah (kontrak kuliah dan media ajar)</li> <li>3. Ketepatan waktu kehadiran dosen</li> <li>4. Lama waktu tatap muka sesuai SKS (1 SKS : 50 menit)</li> <li>5. Upaya membangkitkan minat mahasiswa pada mata kuliah ini di awal kuliah</li> <li>6. Kemampuan menghidupkan suasana kelas</li> <li>7. Sistematika pengorganisasian materi kuliah</li> <li>8. Kesesuaian materi yang diberikan dengan indikator yang ditetapkan</li> <li>9. Kejelasan penyampaian tujuan pembelajaran, materi dan jawaban terhadap pertanyaan di kelas</li> <li>10. Waktu khusus yang disediakan untuk berdiskusi tentang materi kuliah</li> <li>11. Kemampuan mengarahkan diskusi sehingga mencapai sasaran</li> <li>12. Keragaman metode pembelajaran (ceramah, diskusi, tanya jawab)</li> <li>13. Keragaman sumber belajar (referensi, kasus lapangan, pengalaman sendiri, dll)</li> <li>14. Pemanfaatan media dan teknologi pembelajaran</li> <li>15. Pemberian tugas terstruktur (paper, rangkuman, latihan soal/pemecahan masalah, dll)</li> <li>16. Pemberian umpan balik terhadap tugas (pengembalian tugas)</li> <li>17. Keanekaragaman cara pengukuran hasil belajar/evaluasi</li> <li>18. Kesesuaian materi ujian dan/atau tugas dengan tujuan indikator mata kuliah</li> <li>19. Kesesuaian nilai yang diberikan dengan hasil belajar</li> </ol> |
| 2  | Pendapat mahasiswa terhadap kompetensi dosen terkait                             | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Penguasaan terhadap materi pembelajaran</li> <li>2. Kemampuan menjelaskan materi ajar</li> </ol>  |

| No | Informasi yang dibutuhkan  | Indikator  |
|----|--|--|
|    | dengan kompetensi Profesional  | <p>secara sistematis</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>3. Kemampuan memberi contoh relevan dari konsep yang diajarkan</li> <li>4. Kedalaman dan keluasan dalam membahas contoh kasus</li> <li>5. Kemampuan menjelaskan keterkaitan materi ajar yang diajarkan dengan materi ajar lain</li> <li>6. Kemampuan menjelaskan keterkaitan materi ajar yang diajarkan dengan konteks kehidupan</li> <li>7. Penguasaan akan isu-isu mutakhir dalam mata kuliah yang diajarkan</li> <li>8. Penggunaan hasil-hasil penelitian untuk meningkatkan kualitas pembelajaran</li> <li>9. Kemampuan menggunakan beragam teknologi komunikasi untuk pengkayaan materi ajar</li> </ol> |
| 3  | Pendapat mahasiswa terhadap kompetensi dosen terkait dengan kompetensi Kepribadian | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rasa percaya diri akan kemampuan mengajar</li> <li>2. Kewibawaan sebagai pribadi dosen</li> <li>3. Kearifan dalam mengambil keputusan (menyelesaikan persoalan mahasiswa)</li> <li>4. Menjadi contoh dalam bersikap dan berperilaku</li> <li>5. Satunya kata dan tindakan (konsisten)</li> <li>6. Kemampuan mengendalikan diri dalam berbagai situasi</li> <li>7. Adil dalam memperlakukan mahasiswa</li> </ol>  |
| 4  | Pendapat mahasiswa terhadap kompetensi dosen terkait dengan kompetensi sosial      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kemampuan menerima kritik, saran, dan pendapat orang lain</li> <li>2. Kesiediaan meluangkan waktu untuk konsultasi di luar kelas</li> <li>3. Mengenal dengan baik mahasiswa yang mengikuti kuliahnya</li> <li>4. Mudah bergaul dengan segenap civitas (termasuk dengan mahasiswa)</li> <li>5. Toleransi terhadap keberagaman mahasiswa</li> </ol>  |
| 5  | Kebiasaan belajar mahasiswa  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Jumlah pertanyaan mahasiswa</li> </ol>   |

| No | Informasi yang dibutuhkan | Indikator   |
|----|---------------------------|---|
|    |                           | 2. Kualitas pertanyaan mahasiswa<br>3. Cara menjawab pertanyaan dosen di kelas<br>4. Kepatuhan mahasiswa mengerjakan tugas<br>5. Kelengkapan buku-buku pelajaran<br>6. Perhatian mahasiswa pada keseluruhan jalannya perkuliahan<br>7. Presentase kehadiran mahasiswa<br>8. Peningkatan kemampuan/pemahaman mahasiswa terhadap materi perkuliahan |

### 3. Desain Evaluasi

Desain evaluasi merupakan tahapan menentukan pendekatan dalam melakukan evaluasi agar tujuan evaluasi dapat tercapai. Setelah mengetahui informasi yang dibutuhkan dalam evaluasi program pembelajaran, maka perlu mendesain rencana evaluasi seperti pada tabel berikut:

**Tabel Desain Evaluasi**

| No | Informasi yang dibutuhkan  | Indikator  | Metode    |             | Responden | Waktu            |
|----|--|--|-----------|-------------|-----------|------------------|
|    |  |  | Teknik    | Instrument  |           |                  |
| 1  | Pendapat mahasiswa terhadap kompetensi dosen terkait dengan kompetensi pedagogik | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kesiapan memberikan kuliah</li> <li>2. Kelengkapan atribut mata kuliah (kontrak kuliah dan media ajar)</li> <li>3. Ketepatan waktu kehadiran dosen</li> <li>4. Lama waktu tatap muka sesuai SKS ( 1 SKS : 50 menit)</li> <li>5. Upaya membangkitkan minat mahasiswa pada mata kuliah ini di awal kuliah</li> <li>6. Kemampuan menghidupkan suasana kelas</li> <li>7. Sistematika pengorganisasian materi kuliah</li> <li>8. Kesesuaian materi yang diberikan dengan indikator yang ditetapkan</li> <li>9. Kejelasan penyampaian tujuan pembelajaran, materi dan jawaban terhadap pertanyaan di kelas</li> <li>10. Waktu khusus yang disediakan untuk berdiskusi tentang materi kuliah</li> <li>11. Kemampuan mengarahkan diskusi sehingga mencapai sasaran</li> <li>12. Keragaman metode pembelajaran (ceramah, diskusi, tanya jawab)</li> <li>13. Keragaman sumber belajar (referensi, kasus</li> </ol> | Observasi | Kuisisioner | Mahasiswa | Setelah UTS/ UAS |

| No | Informasi yang dibutuhkan  | Indikator  | Metode    |             | Responden | Waktu            |
|----|--|--|-----------|-------------|-----------|------------------|
|    |  |  | Teknik    | Instrument  |           |                  |
|    |  | <p>lapangan, pengalaman sendiri, dll)</p> <p>14. Pemanfaatan media dan teknologi pembelajaran</p> <p>15. Pemberian tugas terstruktur (paper, rangkuman, latihan soal/pemecahan masalah, dll)</p> <p>16. Pemberian umpan balik terhadap tugas (pengembalian tugas)</p> <p>17. Keanekaragaman cara pengukuran hasil belajar/evaluasi</p> <p>18. Kesesuaian materi ujian dan/atau tugas dengan tujuan indikator mata kuliah</p> <p>19. Kesesuaian nilai yang diberikan dengan hasil belajar</p> |           |             |           |                  |
| 2  | Pendapat mahasiswa terhadap kompetensi dosen terkait dengan kompetensi Profesional | <p>1. Penguasaan terhadap materi pembelajaran</p> <p>2. Kemampuan menjelaskan materi ajar secara sistematis</p> <p>3. Kemampuan memberi contoh relevan dari konsep yang diajarkan</p> <p>4. Kedalaman dan keluasan dalam membahas contoh kasus</p> <p>5. Kemampuan menjelaskan keterkaitan materi ajar yang diajarkan dengan materi ajar lain</p> <p>6. Kemampuan menjelaskan keterkaitan materi</p>   | Observasi | Kuisisioner | Mahasiswa | Setelah UTS/ UAS |

| No | Informasi yang dibutuhkan  | Indikator   | Metode    |             | Responden | Waktu            |
|----|--|---|-----------|-------------|-----------|------------------|
|    |  |   | Teknik    | Instrument  |           |                  |
|    |  | ajar yang diajarkan dengan konteks kehidupan<br>7. Penguasaan akan isu-isu mutakhir dalam mata kuliah yang diajarkan<br>8. Penggunaan hasil-hasil penelitian untuk meningkatkan kualitas pembelajaran<br>9. Kemampuan menggunakan beragam teknologi komunikasi untuk pengkayaan materi ajar   |           |             |           |                  |
| 3  | Pendapat mahasiswa terhadap kompetensi dosen terkait dengan kompetensi Kepribadian | 1. Rasa percaya diri akan kemampuan mengajar<br>2. Kewibawaan sebagai pribadi dosen<br>3. Kearifan dalam mengambil keputusan (menyelesaikan persoalan mahasiswa)<br>4. Menjadi contoh dalam bersikap dan berperilaku<br>5. Satunya kata dan tindakan (konsisten)<br>6. Kemampuan mengendalikan diri dalam berbagai situasi<br>7. Adil dalam memperlakukan mahasiswa | Observasi | Kuisisioner | Mahasiswa | Setelah UTS/ UAS |
| 4  | Pendapat mahasiswa terhadap kompetensi dosen terkait dengan kompetensi sosial      | 1. Kemampuan menerima kritik, saran, dan pendapat orang lain<br>2. Kesiediaan meluangkan waktu untuk konsultasi di luar kelas<br>3. Mengenal dengan baik mahasiswa yang mengikuti kuliahnya<br>4. Mudah bergaul dengan segenap civitas  | Observasi | Kuisisioner | Mahasiswa | Setelah UTS/ UAS |

| No | Informasi yang dibutuhkan   | Indikator  | Metode    |             | Responden | Waktu                              |
|----|-----------------------------|--|-----------|-------------|-----------|------------------------------------|
|    |                             |  | Teknik    | Instrument  |           |                                    |
|    |                             | (termasuk dengan mahasiswa)<br>5. Toleransi terhadap keberagaman mahasiswa   |           |             |           |                                    |
| 5  | Kebiasaan belajar mahasiswa | 1. Jumlah pertanyaan mahasiswa<br>2. Kualitas pertanyaan mahasiswa<br>3. Cara menjawab pertanyaan dosen di kelas<br>4. Kepatuhan mahasiswa mengerjakan tugas<br>5. Kelengkapan buku-buku pelajaran<br>6. Perhatian mahasiswa pada keseluruhan jalannya perkuliahan<br>7. Presentase kehadiran mahasiswa<br>8. Peningkatan kemampuan/ pemahaman mahasiswa terhadap materi perkuliahan | Observasi | Kuisisioner | Dosen     | Pertemuan ke-6 dan pertemuan ke-14 |

#### **4. Pengembangan Instrumen Evaluasi**

Pengembangan instrumen evaluasi dilakukan melalui daftar pertanyaan untuk mengumpulkan informasi terkait dengan kompetensi dosen yang meliputi kompetensi pedagogik, Profesional, Kepribadian, dan Kompetensi sosial dosen dan informasi terkait kebiasaan belajar mahasiswa dalam perkuliahan. Adapun instrument evaluasi yang digunakan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan adalah kuisisioner.

## KUISIONER EVALUASI PROGRAM PEMBELAJARAN TERKAIT KOMPETENSI PEDAGOGIK

Jurusan/Prodi : ..... Mata Kuliah : .....  
Semester : ..... Kelas : .....

### PETUNJUK :

 Berikan penilaian terhadap komponen evaluasi di bawah ini dengan cara **mententang ( ) pada kolom nilai** sesuai dengan pendapat anda untuk **setiap indikator** sesuai nama Nama Dosen Pengampu mata kuliah:

1. Bapak Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si
2. Ibu Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si

 Sesuai dengan yang anda ketahui, berilah penilaian secara jujur, objektif, dan penuh tanggung jawab terhadap DOSEN anda. Informasi yang anda berikan akan dipergunakan sebagai bahan masukan bagi dosen dan tidak akan berpengaruh terhadap status anda sebagai mahasiswa. Penilaian dilakukan terhadap aspek-aspek dalam tabel berikut dengan kriteria rentang skor 1 sampai dengan 5:

- 1 : Sangat tidak baik/sangat rendah/tidak pernah/tidak lengkap**
- 2 : Tidak baik/rendah/jarang/kurang lengkap**
- 3 : Biasa/cukup/kadang-kadang/cukup lengkap**
- 4 : Baik/tinggi/sering/lengkap**
- 5 : Sangat baik/sangat tinggi/selalu/sangat lengkap**

| No | Indikator   | Nilai |   |   |   |   |
|----|---|-------|---|---|---|---|
|    |   | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1  | Kesiapan memberikan kuliah  |       |   |   |   |   |
| 2  | Kelengkapan atribut mata kuliah (kontrak kuliah dan media ajar)         |       |   |   |   |   |
| 3  | Ketepatan waktu kehadiran dosen   |       |   |   |   |   |
| 4  | Lama waktu tatap muka sesuai SKS ( 1 SKS : 50 menit)                    |       |   |   |   |   |
| 5  | Upaya membangkitkan minat mahasiswa pada mata kuliah ini di awal kuliah |       |   |   |   |   |
| 6  | Kemampuan menghidupkan suasana kelas                                    |       |   |   |   |   |
| 7  | Sistematika pengorganisasian materi kuliah                              |       |   |   |   |   |

|                    |  |  |  |  |  |  |
|--------------------|--|--|--|--|--|--|
| 8                  | Kesesuaian materi yang diberikan dengan indikator yang ditetapkan                          |  |  |  |  |  |
| 9                  | Kejelasan penyampaian tujuan pembelajaran, materi dan jawaban terhadap pertanyaan di kelas |  |  |  |  |  |
| 10                 | Waktu khusus yang disediakan untuk berdiskusi tentang materi kuliah                        |  |  |  |  |  |
| 11                 | Kemampuan mengarahkan diskusi sehingga mencapai sasaran                                    |  |  |  |  |  |
| 12                 | Keragaman metode pembelajaran (ceramah, diskusi, tanya jawab)                              |  |  |  |  |  |
| 13                 | Keragaman sumber belajar (referensi, kasus lapangan, pengalaman sendiri, dll)              |  |  |  |  |  |
| 14                 | Pemanfaatan media dan teknologi pembelajaran   |  |  |  |  |  |
| 15                 | Pemberian tugas terstruktur (paper, rangkuman, latihan soal/pemecahan masalah, dll)        |  |  |  |  |  |
| 16                 | Pemberian umpan balik terhadap tugas (pengembalian tugas)                                  |  |  |  |  |  |
| 17                 | Keanekaragaman cara pengukuran hasil belajar/evaluasi                                      |  |  |  |  |  |
| 18                 | Kesesuaian materi ujian dan/atau tugas dengan tujuan indikator mata kuliah                 |  |  |  |  |  |
| 19                 | Kesesuaian nilai yang diberikan dengan hasil belajar                                       |  |  |  |  |  |
| <b>Jumlah</b>      |  |  |  |  |  |  |
| <b>Rata - rata</b> |  |  |  |  |  |  |

 **Saran :**

.....

.....

.....

.....

## KUISIONER EVALUASI PROGRAM PEMBELAJARAN TERKAIT KOMPETENSI PROFESIONAL

Jurusan/Prodi : ..... Mata Kuliah : .....  
Semester : ..... Kelas : .....

### PETUNJUK :

 Berikan penilaian terhadap komponen evaluasi di bawah ini dengan cara **mententang ( ) pada kolom nilai** sesuai dengan pendapat anda untuk **setiap indikator** sesuai nama Nama Dosen Pengampu mata kuliah:

1. Bapak Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si
2. Ibu Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si

 Sesuai dengan yang anda ketahui, berilah penilaian secara jujur, objektif, dan penuh tanggung jawab terhadap **DOSEN** anda. Informasi yang anda berikan akan dipergunakan sebagai bahan masukan bagi dosen dan tidak akan berpengaruh terhadap status anda sebagai mahasiswa. Penilaian dilakukan terhadap aspek-aspek dalam tabel berikut dengan kriteria rentang skor 1 sampai dengan 5:

- 1 : Sangat tidak baik/sangat rendah/tidak pernah/tidak lengkap**
- 2 : Tidak baik/rendah/jarang/kurang lengkap**
- 3 : Biasa/cukup/kadang-kadang/cukup lengkap**
- 4 : Baik/tinggi/sering/lengkap**
- 5 : Sangat baik/sangat tinggi/selalu/sangat lengkap**

| No | Indikator   | Nilai |   |   |   |   |
|----|---|-------|---|---|---|---|
|    |   | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1  | Penguasaan terhadap materi pembelajaran   |       |   |   |   |   |
| 2  | Kemampuan menjelaskan materi ajar secara sistematis                                   |       |   |   |   |   |
| 3  | Kemampuan memberi contoh relevan dari konsep yang diajarkan                           |       |   |   |   |   |
| 4  | Kedalaman dan keluasan dalam membahas contoh kasus                                    |       |   |   |   |   |
| 5  | Kemampuan menjelaskan keterkaitan materi ajar yang diajarkan dengan materi ajar lain  |       |   |   |   |   |
| 6  | Kemampuan menjelaskan keterkaitan materi ajar yang diajarkan dengan konteks kehidupan |       |   |   |   |   |

|                    |   |  |  |  |  |  |
|--------------------|---|--|--|--|--|--|
| 7                  | Penguasaan akan isu-isu mutakhir dalam mata kuliah yang diajarkan               |  |  |  |  |  |
| 8                  | Penggunaan hasil-hasil penelitian untuk meningkatkan kualitas pembelajaran      |  |  |  |  |  |
| 9                  | Kemampuan menggunakan beragam teknologi komunikasi untuk pengkayaan materi ajar |  |  |  |  |  |
| <b>Jumlah</b>      |   |  |  |  |  |  |
| <b>Rata - rata</b> |   |  |  |  |  |  |

 **Saran :**

.....

.....

.....

.....

## KUISIONER EVALUASI PROGRAM PEMBELAJARAN TERKAIT KOMPETENSI KEPERIBADIAN

Jurusan/Prodi : ..... Mata Kuliah : .....  
Semester : ..... Kelas : .....

### PETUNJUK :

 Berikan penilaian terhadap komponen evaluasi di bawah ini dengan cara **mentcentang ( ) pada kolom nilai** sesuai dengan pendapat anda untuk **setiap indikator** sesuai nama Nama Dosen Pengampu mata kuliah:

1. Bapak Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si
2. Ibu Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si

 Sesuai dengan yang anda ketahui, berilah penilaian secara jujur, objektif, dan penuh tanggung jawab terhadap **DOSEN** anda. Informasi yang anda berikan akan dipergunakan sebagai bahan masukan bagi dosen dan tidak akan berpengaruh terhadap status anda sebagai mahasiswa. Penilaian dilakukan terhadap aspek-aspek dalam tabel berikut dengan kriteria rentang skor 1 sampai dengan 5:

- 1 : Sangat tidak baik/sangat rendah/tidak pernah/tidak lengkap**
- 2 : Tidak baik/rendah/jarang/kurang lengkap**
- 3 : Biasa/cukup/kadang-kadang/cukup lengkap**
- 4 : Baik/tinggi/sering/lengkap**
- 5 : Sangat baik/sangat tinggi/selalu/sangat lengkap**

| No | Indikator  | Nilai |   |   |   |   |
|----|--|-------|---|---|---|---|
|    |  | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1  | Rasa percaya diri akan kemampuan mengajar                              |       |   |   |   |   |
| 2  | Kewibawaan sebagai pribadi dosen                                       |       |   |   |   |   |
| 3  | Kearifan dalam mengambil keputusan (menyelesaikan persoalan mahasiswa) |       |   |   |   |   |
| 4  | Menjadi contoh dalam bersikap dan berperilaku                          |       |   |   |   |   |
| 5  | Satunya kata dan tindakan (konsisten)                                  |       |   |   |   |   |
| 6  | Kemampuan mengendalikan diri dalam berbagai situasi                    |       |   |   |   |   |
| 7  | Adil dalam memperlakukan mahasiswa                                     |       |   |   |   |   |

|                    |  |  |  |  |  |
|--------------------|--|--|--|--|--|
| <b>Jumlah</b>      |  |  |  |  |  |
| <b>Rata - rata</b> |  |  |  |  |  |

 **Saran :**

.....

.....

.....

.....

## KUISIONER EVALUASI PROGRAM PEMBELAJARAN TERKAIT KOMPETENSI SOSIAL

Jurusan/Prodi : ..... Mata Kuliah : .....  
Semester : ..... Kelas : .....

### PETUNJUK :

 Berikan penilaian terhadap komponen evaluasi di bawah ini dengan cara **mententang ( ) pada kolom nilai** sesuai dengan pendapat anda untuk **setiap indikator** sesuai nama Nama Dosen Pengampu mata kuliah:

1. Bapak Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si
2. Ibu Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si

 Sesuai dengan yang anda ketahui, berilah penilaian secara jujur, objektif, dan penuh tanggung jawab terhadap **DOSEN** anda. Informasi yang anda berikan akan dipergunakan sebagai bahan masukan bagi dosen dan tidak akan berpengaruh terhadap status anda sebagai mahasiswa. Penilaian dilakukan terhadap aspek-aspek dalam tabel berikut dengan kriteria rentang skor 1 sampai dengan 5:

- 1 : Sangat tidak baik/sangat rendah/tidak pernah/tidak lengkap**
- 2 : Tidak baik/rendah/jarang/kurang lengkap**
- 3 : Biasa/cukup/kadang-kadang/cukup lengkap**
- 4 : Baik/tinggi/sering/lengkap**
- 5 : Sangat baik/sangat tinggi/selalu/sangat lengkap**

| No            | Indikator  | Nilai |   |   |   |   |
|---------------|--|-------|---|---|---|---|
|               |  | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1             | Kemampuan menerima kritik, saran, dan pendapat orang lain        |       |   |   |   |   |
| 2             | Kesediaan meluangkan waktu untuk konsultasi di luar kelas        |       |   |   |   |   |
| 3             | Mengenal dengan baik mahasiswa yang mengikuti kuliahnya          |       |   |   |   |   |
| 4             | Mudah bergaul dengan segenap civitas (termasuk dengan mahasiswa) |       |   |   |   |   |
| 5             | Toleransi terhadap keberagaman mahasiswa                         |       |   |   |   |   |
| <b>Jumlah</b> |  |       |   |   |   |   |

|             |  |
|-------------|--|
| Rata - rata |  |
|-------------|--|

 **Saran :**

.....

.....

.....

.....

## KUISIONER EVALUASI KEBIASAAN BELAJAR MAHASISWA

Jurusan/Prodi : ..... Mata Kuliah : .....

Semester : ..... Kelas : .....

**PETUNJUK :**

 Berikan penilaian terhadap komponen evaluasi di bawah ini dengan cara **mencentang ( ) pada kolom nilai** untuk **setiap indikator**.

 Penilaian dilakukan terhadap aspek-aspek dalam tabel berikut dengan kriteria rentang skor 1 sampai dengan 5:

**1 : Kurang**

**2 : Cukup**

**3 : Sedang**

**4 : Baik**

**5 : Sangat baik**

| No                 | Indikator  | Nilai |   |   |   |   |
|--------------------|--|-------|---|---|---|---|
|                    |  | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1                  | Jumlah pertanyaan mahasiswa  |       |   |   |   |   |
| 2                  | Kualitas pertanyaan mahasiswa  |       |   |   |   |   |
| 3                  | Cara menjawab pertanyaan dosen di kelas                                |       |   |   |   |   |
| 4                  | Kepatuhan mahasiswa mengerjakan tugas                                  |       |   |   |   |   |
| 5                  | Kelengkapan buku-buku pelajaran  |       |   |   |   |   |
| 6                  | Perhatian mahasiswa pada keseluruhan jalannya perkuliahan              |       |   |   |   |   |
| 7                  | Presentase kehadiran mahasiswa   |       |   |   |   |   |
| 8                  | Peningkatan kemampuan/ pemahaman mahasiswa terhadap materi perkuliahan |       |   |   |   |   |
| <b>Jumlah</b>      |  |       |   |   |   |   |
| <b>Rata - rata</b> |  |       |   |   |   |   |

 **Saran :**

.....  
 .....



## 5. Analisis Data Rancangan Evaluasi Program Pembelajaran

### 5.1 Analisis dan Interpretasi Data Rancangan Evaluasi Program Pembelajaran Terkait Kompetensi Dosen

Analisis Data Rancangan Evaluasi Program Pembelajaran Terkait Kompetensi Dosen diperoleh dengan cara membagi jumlah rata – rata nilai data dengan banyak data.

$$KD = \frac{\sum x}{n}$$

Keterangan:

KD : Kompetensi Dosen



: Jumlah rata – rata nilai data

$n$  : Banyak data

Adapun Kriteria tingkat kompetensi dosen dalam program pembelajaran adalah sebagai berikut:mengelola PBM:

| Hasil Analisis Data      | Interpretasi  |
|--------------------------|---|
| $1,00 \leq KD \leq 1,50$ | Sangat tidak baik<br>Sangat rendah<br>Tidak pernah<br>Tidak lengkap |
| $1,50 \leq KD \leq 2,50$ | Tidak baik<br>Rendah<br>Jarang<br>Kurang lengkap                    |
| $2,50 \leq KD \leq 3,50$ | Biasa<br>Cukup<br>Kadang-kadang<br>Cukup lengkap                    |
| $3,50 \leq KD \leq 4,50$ | Baik<br>Tinggi<br>Sering<br>Lengkap                                 |
| $4,50 \leq KD \leq 5,00$ | Sangat baik<br>Sangat tinggi<br>Selalu<br>Sangat lengkap            |

Kriteria tingkat kompetensi dosen dalam program pembelajaran dikatakan baik jika skor rata-rata tingkat kompetensi dosen dalam program pembelajaran berada pada kategori minimal baik.

## 5.2 Analisis Data Rancangan Evaluasi Program Pembelajaran Terkait Kebiasaan Belajar Mahasiswa

Analisis Data Rancangan Evaluasi Program Pembelajaran Terkait kebiasaan belajar mahasiswa diperoleh dengan cara membagi jumlah nilai data dengan banyak data.

$$KBM = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Keterangan:

KBM : Kebiasaan Belajar Mahasiswa



: Jumlah nilai data

$n$  : Banyak data

Adapun kriteria tingkat kebiasaan Belajar Mahasiswa dalam program pembelajaran adalah sebagai berikut:

- 1,00 ≤ TKD ≤ 1,50 : Kurang
- 1,50 ≤ TKD ≤ 2,50 : Cukup
- 2,50 ≤ TKD ≤ 3,50 : Sedang
- 3,50 ≤ TKD ≤ 4,50 : Baik
- 4,50 ≤ TKD ≤ 5,00 : Sangat baik

Kriteria tingkat kebiasaan Belajar Mahasiswa dalam program pembelajaran dikatakan baik jika skor rata-rata tingkat kebiasaan Belajar Mahasiswa dalam program pembelajaran berada pada kategori minimal baik.

## 4. EVALUASI ALTERNATIF

Perguruan Tinggi : Universitas Mulawarman  
 Fakultas : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
 Program Studi : Fisika  
 Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
 Kode Mata Kuliah : 190704603W034  
 Semester/sks : VI (Enam) / 3 SKS  
 Mata Kuliah Prasyarat : Fisika Kuantum, Fisika Modern, Listrik Magnet  
 Nama Dosen : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si  
 Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si

**Tabel Evaluasi Alternatif**

| Pert. Ke- | Kemampuan Khusus (Sub CPMK)                            | Materi Pokok  | Teknik  | Bentuk  | Instrumen                |
|-----------|--|---|---------|---------|--------------------------|
| 1         | Mahasiswa mampu memahami struktur kristal zat padat    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dasar-dasar struktur kristal</li> <li>• Sel satuan: struktur sel primitive</li> <li>• Operasi simetri</li> <li>• Tipe-tipe kristal</li> <li>• Arah kisi dan bidang kisi</li> <li>• Grup titik dan ruang kristal</li> <li>• Struktur kristal tertentu</li> <li>• Kuasi kristal</li> </ul> | Non Tes | Makalah | Rubrik Penilaian Makalah |
| 2         | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep Ikatan kristal | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kohesi atom</li> <li>• Ikatan atom utama</li> <li>• Ikatan atom sekunder</li> <li>• Energi kohesif</li> <li>• Konstanta elastik kristal</li> <li>• Gelombang elastik pada kristal kubik</li> </ul>   | Non Tes | Makalah | Rubrik Penilaian Makalah |
| 3         | Mahasiswa mampu menginterpretasikan                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kisi resiprok</li> </ul>   | Non Tes | Makalah | Rubrik Penilaian         |

| Pert. Ke- | Kemampuan Khusus (Sub CPMK)  | Materi Pokok  | Teknik  | Bentuk  | Instrumen                |
|-----------|--|---|---------|---------|--------------------------|
|           | tentang konsep kisi resiprok dan penentuan struktur kristal        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hukum Bragg</li> <li>Konstruksi kisi resiprok</li> <li>Hubungan antara <b>a, b, c</b> dengan <b>a*, b*, c*</b></li> <li>Pengukuran pola difraksi kristal</li> <li>Penentuan konstanta kisi</li> </ul>  |         |         | Makalah                  |
| 4         | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep vibrasi kristal            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Model harmonik kristal</li> <li>Mode normal rantai monoatomik 1D</li> <li>Mode normal rantai diatomik 1D</li> <li>Teori umum pendekatan harmonik</li> <li>Kuantisasi vibrasi kisi</li> </ul>   | Non Tes | Makalah | Rubrik Penilaian Makalah |
| 5         | Mahasiswa mampu memahami tentang konsep sifat-sifat termal padatan | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kapasitas panas berdasarkan tinjauan klasik</li> <li>Kapasitas panas berdasarkan tinjauan kuantum</li> <li>Efek tak-harmonik (un-harmonic)</li> </ul>  | Non Tes | Makalah | Rubrik Penilaian Makalah |
| 6         | Mahasiswa mampu memahami tentang teori elektron bebas pada logam   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Model Drude</li> <li>Modifikasi Lorentz pada Model Drude</li> <li>Fungsi distribusi Fermi-Dirac</li> <li>Model Sommerfeld</li> <li>Kapasitas panas elektron</li> <li>Teori Sommerfeld pada elektron konduksi dalam logam</li> <li>Aturan Matthiessen</li> <li>Bahan termoelektrik</li> </ul> | Non Tes | Makalah | Rubrik Penilaian Makalah |

| Pert. Ke- | Kemampuan Khusus (Sub CPMK)  | Materi Pokok   | Teknik  | Bentuk         | Instrumen                       |
|-----------|--|--|---------|----------------|---------------------------------|
| 7         | Mahasiswa mampu memahami konsep pita energi elektron                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsekuensi dari periodisitas</li> <li>• Interpretasi gelombang mekanik dalam pita energi</li> <li>• Model Kronig-Penney</li> <li>• Model elektron hampir bebas</li> <li>• Skema zona pita energi</li> <li>• Pita energi dalam potensial periodik</li> <li>• Isolator, semikonduktor dan konduktor</li> </ul> | Non Tes | Makalah        | Rubrik Penilaian Makalah        |
| 8         | <b>Ujian Tengah Semester (UTS)</b>                                     |  |         |                |                                 |
| 9         | Mahasiswa mampu memahami konsep mobilitas elektron dan permukaan Fermi | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsep hole</li> <li>• Massa efektif</li> <li>• Konstruksi permukaan Fermi</li> <li>• Elektron dalam medan magnet seragam</li> <li>• Resonansi siklotron</li> </ul>   | Non Tes | Makalah        | Rubrik Penilaian Makalah        |
| 10-11     | Mahasiswa mampu mengklasifikasikan konsep Semikonduktor                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pengelompokan semikonduktor</li> <li>• Struktur pita energi</li> <li>• Rapat pembawa muatan intrinsik</li> <li>• Semikonduktor ekstrinsik</li> <li>• Populasi tingkat donor dan akseptor dalam keadaan setimbang</li> </ul>   | Non Tes | <i>Project</i> | Rubrik Penilaian <i>Project</i> |
|           |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapat pembawa muatan ekstrinsik</li> <li>• Ketergantungan konduktivitas listrik pada temperatur</li> </ul>  | Non Tes | <i>Project</i> | Rubrik Penilaian <i>Project</i> |

| Pert. Ke- | Kemampuan Khusus (Sub CPMK)  | Materi Pokok  | Teknik  | Bentuk  | Instrumen                |
|-----------|--|---|---------|---------|--------------------------|
|           |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efek Hall</li> <li>• Sambungan p-n</li> <li>• Efek termoelektrik</li> </ul>  |         |         |                          |
| 12        | Mahasiswa mampu memahami sifat kemagnetan bahan                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terminologi kemagnetan bahan</li> <li>• Tipe-tipe kemagnetan bahan</li> <li>• Diamagnetisme</li> <li>• Paramagnetisme</li> </ul>   | Non Tes | Makalah | Rubrik Penilaian Makalah |
| 13        | Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep dielektrik                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polarisasi</li> <li>• Konstanta dielektrik</li> <li>• Medan listrik lokal</li> <li>• Polarisabilitas dielektrik dan sumbernya</li> <li>• Rugi-rugi dielektrik</li> <li>• Fenomena optik</li> <li>• Aplikasi Plasma</li> <li>• Aplikasi mode fonon pada kristal ionik</li> </ul>  | Non Tes | Makalah | Rubrik Penilaian Makalah |
| 14        | Mahasiswa mampu mengklasifikasikan tentang konsep superkonduktivitas | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendahuluan dan sejarah perkembangan</li> <li>• Resistivitas listrik</li> <li>• Efek Meissner</li> <li>• Arus-super dan kedalaman penetrasi</li> <li>• Superkonduktor tipe I dan II</li> <li>• Sifat termodinamik dan optik</li> <li>• Efek isotop</li> <li>• Efek Josephson</li> <li>• Teori BCS</li> <li>• Aplikasi</li> </ul> | Non Tes | Makalah | Rubrik Penilaian Makalah |
| 15        | Mahasiswa mampu  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendahuluan</li> </ul>   | Non Tes | Makalah | Rubrik                   |

| Pert. Ke- | Kemampuan Khusus (Sub CPMK)       | Materi Pokok   | Teknik | Bentuk | Instrumen         |
|-----------|-----------------------------------|--|--------|--------|-------------------|
|           | memahami konsep Nano-Material     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nano-partikel</li> <li>• Nano-struktur</li> <li>• Silikon berporos</li> <li>• Teknik Fabrikasi</li> </ul> |        |        | Penilaian Makalah |
| 16        | <b>Ujian Akhir Semester (UAS)</b> |  |        |        |                   |

## 4.1 RUBRIK PENILAIAN MAKALAH

| Aspek                           | Kriteria penilaian    | Nilai  |  |  |  |
|---------------------------------|-----------------------|--|--|--|--|
|                                 |                       | 1  | 2  | 3  | 4  |
| <b>Konten</b>                   |                       |  |  |  |  |
| Latar Belakang /<br>Pendahuluan | Fenomena              | Tidak memaparkan fenomena  | Hanya sedikit menggambarkan fenomena   | Fenomena cukup tergambarkan  | Fenomena tergambarkan dengan sangat kuat                           |
|                                 | Urgensi               | Urgensi permasalahan tidak dipaparkan                                | Urgensi permasalahan hanya sedikit tergambarkan                                      | Urgensi permasalahan cukup tergambarkan                                | Urgensi permasalahan tergambar dengan jelas                        |
|                                 | Konstruk yang dibahas | Konstruk sama sekali tidak relevan dengan latar belakang yang dibuat | Konstruk kurang relevan dengan latar belakang yang dibuat                            | Konstruk cukup relevan dengan latar belakang yang dibuat               | Konstruk sangat relevan dengan latar belakang yang dibuat          |
| Isi/Teori/Pembahasan            | Kedalaman             | Isi/Teori/Pembahasan tidak dibuat sama sekali                        | Isi/Teori/Pembahasan sudah dibuat namun masih dangkal                                | Isi/Teori/Pembahasan cukup komprehensif                                | Isi/Teori/Pembahasan dipaparkan secara mendalam dan komprehensif   |
| Kesimpulan                      |                       | Makalah tidak memiliki kesimpulan                                    | Makalah sudah memiliki kesimpulan, namun tidak memiliki koherensi dengan isi tulisan | Makalah sudah memiliki kesimpulan dan cukup koheren dengan isi tulisan | Makalah memiliki kesimpulan yang sangat koheren dengan isi tulisan |

| Aspek                                     | Kriteria penilaian  | Nilai   |  |  |   |
|---|---|---|--|--|---|
|   |   | 1   | 2  | 3  | 4   |
| <b>Struktur makalah</b>                   |   |   |  |  |   |
| Latar Belakang / Pendahuluan              | Latar Belakang tidak sesuai dengan format penulisan       | 40% dari latar belakang sesuai dengan format penulisan                              | 41%-80% dari latar belakang sesuai dengan format penulisan                                   | > 81% dari latar belakang sesuai dengan format penulisan   |   |
| Isi/Teori/Pembahasan                      | Isi/Teori/Pembahasan tidak sesuai dengan format penulisan | 40% dari Isi/Teori/Pembahasan sesuai dengan format penulisan                        | 41%-80% dari Isi/Teori/Pembahasan sesuai dengan format penulisan                             | > 81% dari Isi/Teori/Pembahasan sesuai dengan format penulisan                                   |   |
| Kesimpulan                                | Kesimpulan tidak sesuai dengan format penulisan           | 40% dari kesimpulan sesuai dengan format penulisan                                  | 41%-80% dari kesimpulan sesuai dengan format penulisan                                       | > 81% dari kesimpulan sesuai dengan format penulisan   |   |
| <b>Penulisan makalah</b>                  |   |   |  |  |   |
| Tata Cara Penulisan                       | Pengutipan, Tabel & Simbol Statistik, Daftar Pustaka      | Pengutipan, Tabel & Simbol Statistik, Daftar Pustaka tidak sesuai dengan format APA | 40% dari Pengutipan, Tabel & Simbol Statistik, Daftar Pustaka sesuai dengan format penulisan | 41%-80% dari Pengutipan, Tabel & Simbol Statistik, Daftar Pustaka sesuai dengan format penulisan | > 81% Pengutipan, Tabel & Simbol Statistik, Daftar Pustaka sesuai dengan format penulisan |
| Referensi (Jumlah, Kebaharuan, Relevansi) | Jumlah  | Tidak menggunakan referensi sama sekali   | Makalah memiliki 1-2 referensi ilmiah (jurnal & buku)  | Makalah memiliki 3-4 referensi ilmiah (jurnal & buku)  | Makalah memiliki minimal 5 referensi ilmiah (jurnal & buku)                               |
|   | Kebaharuan (referensi)                                    | Tidak ada referensi   | Makalah memiliki   | Makalah memiliki   | Makalah memiliki  |

| Aspek     | Kriteria penilaian   | Nilai  |   |   |   |
|-----------|--|--|---|---|---|
|           |  | 1  | 2   | 3   | 4   |
|           | maksimal 10 tahun terakhir)                                    | mutakhir yang digunakan                              | kurang dari 50% referensi ilmiah (buku & jurnal) mutakhir | minimal 50%-79% referensi ilmiah (buku & jurnal) mutakhir | minimal 80% referensi ilmiah (buku & jurnal) mutakhir |
|           | Relevansi (kesesuaian referensi dengan konstruk yang dibahas)  | Makalah tidak memiliki referensi yang relevan        | Makalah memiliki kurang dari 50% referensi yang relevan   | Makalah memiliki minimal 50%-79% referensi yang relevan   | Makalah memiliki minimal 80% referensi yang relevan   |
| Kerapihan | PUEBI (Pedoman Umum Ejaan Bahasa Indonesia)                    | Cara Penulisan tidak memperhatikan PUEBI sama sekali | Kurang dari 50% dari cara penulisan sesuai dengan PUEBI   | 51%-80% dari cara penulisan sesuai dengan PUEBI           | > 81% dari cara penulisan sesuai dengan PUEBI         |
|           | Pengetikan   | Terdapat >20 kesalahan pengetikan                    | Terdapat 11-20 kesalahan pengetikan                       | Terdapat 4-10 kesalahan pengetikan                        | Maksimal terdapat 3 kesalahan pengetikan              |
|           | Kebersihan (tidak ada noda, tidak lusuh, tidak terlipat-lipat) | Tidak memenuhi sama sekali unsur kebersihan          | Hanya memenuhi 1 unsur dari aspek kebersihan.             | Hanya memenuhi 2 unsur dari aspek kebersihan              | Memenuhi seluruh unsur dari aspek kebersihan          |

**Catatan :**

Persentase penilaian :

-  Konten 60%
-  Struktur makalah 20%
-  Penulisan makalah 20%

## 4.2 FORM PENILAIAN MAKALAH

Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
 Indikator : .....  
 Materi ajar : .....  
 Kelas/Semester : .....  
 Nama : .....  
 Judul makalah : .....

| Bagian makalah    |                                 |  | Nilai |   |   |   | Jumlah | Nilai Akhir* |
|-------------------|---------------------------------|--|-------|---|---|---|--------|--------------|
|                   |                                 |  | 1     | 2 | 3 | 4 |        |              |
| Konten            | Latar Belakang /<br>Pendahuluan | Fenomena   |       |   |   |   | A      | A1           |
|                   |                                 | Urgensi  |       |   |   |   |        |              |
|                   |                                 | Konstruk yang dibahas  |       |   |   |   |        |              |
|                   | Isi/Teori/Pembahasan            | Teori dari variabel-<br>variabel yang<br>digunakan                   |       |   |   |   |        |              |
|                   | Kesimpulan                      |  |       |   |   |   |        |              |
| Struktur makalah  | Latar Belakang /<br>Pendahuluan |  |       |   |   | B | B1     |              |
|                   | Isi/Teori/Pembahasan            |  |       |   |   |   |        |              |
|                   | Kesimpulan                      |  |       |   |   |   |        |              |
| Penulisan makalah | Tata Cara Penulisan             | Pengutipan, Tabel &<br>Simbol Statistik, Daftar<br>Pustaka           |       |   |   | C | C1     |              |
|                   | Referensi                       | Jumlah   |       |   |   |   |        |              |
|                   |                                 | Kebaharuan (referensi<br>maksimal 10 tahun<br>terakhir)              |       |   |   |   |        |              |
|                   |                                 | Relevansi (kesesuaian<br>referensi dengan<br>konstruk yang dibahas   |       |   |   |   |        |              |
|                   | Kerapihan                       | PUEBI (Pedoman<br>Umum Ejaan Bahasa<br>Indonesia)                    |       |   |   |   |        |              |
|                   |                                 | Pengetikan   |       |   |   |   |        |              |
|                   |                                 | Kebersihan (tidak ada<br>noda, tidak lusuh, tidak<br>terlipat-lipat) |       |   |   |   |        |              |

| Bagian makalah             | Nilai |   |   |   | Jumlah | Nilai Akhir* |
|----------------------------|-------|---|---|---|--------|--------------|
|                            | 1     | 2 | 3 | 4 |        |              |
| <b>Total Nilai Akhir**</b> |       |   |   |   |        |              |

Nilai Akhir\* A1 =  $(A/20) \times 100 \times 60\% = \dots$

Nilai Akhir\* B1 =  $(B/12) \times 100 \times 20\% = \dots$

Nilai Akhir\* C1 =  $(C/28) \times 100 \times 20\% = \dots$

**Total Nilai Akhir\*\* = A1 + B1 + C1 = ...**

### 4.3 INSTRUMEN PENILAIAN *PROJECT*

Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
 Indikator : .....  
 Materi ajar : .....  
 Kelas/Semester : .....  
 Kelompok : .....  
 Nama *Project* : .....

#### Petunjuk Pengisian

| Komponen yang dinilai  | Kriteria  | Nilai |
|------------------------|---|-------|
| Topik                  | Sesuai materi pembelajaran, orisinal, konstektual   | 5     |
|                        | Sesuai materi pembelajaran, orisinal, tidak konstektual   | 4     |
|                        | Sesuai materi pembelajaran, tidak orisinal, konstektual   | 3     |
|                        | Sesuai materi pembelajaran, tidak orisinal, tidak konstektual   | 2     |
|                        | Tidak sesuai materi pembelajaran, tidak orisinal, tidak konstektual   | 1     |
| Diagram <i>Project</i> | Mencerminkan hubungan, ada peluang penemuan   | 5     |
|                        | Mencerminkan hubungan, tidak ada peluang penemuan   | 4     |
|                        | Kurang mencerminkan hubungan, ada peluang penemuan  | 3     |
|                        | Kurang mencerminkan hubungan, ada peluang penemuan  | 2     |
|                        | Tidak membuat diagram   | 1     |
| Tahapan proses Proyek  | Lengkap, sistematis, metodologis  | 5     |
|                        | Lengkap, kurang sistematis, metodologis   | 4     |
|                        | Lengkap, sistematis, kurang metodologis   | 3     |
|                        | Lengkap, kurang sistematis, kurang metodologis  | 2     |
|                        | Kurang lengkap, kurang sistematis, kurang metodologis   | 1     |
| Monitoring             | Sesuai tahapan proyek, jadwal jelas, ada lembar kemajuan  | 5     |
|                        | Sesuai tahapan proyek, jadwal jelas, tidak ada lembar kemajuan  | 4     |
|                        | Sesuai tahapan proyek, jadwal tidak jelas, ada lembar kemajuan  | 3     |
|                        | Sesuai tahapan proyek, jadwal tidak jelas, tidak ada lembar kemajuan  | 2     |
|                        | Tidak sesuai tahapan proyek   | 1     |
| Laporan <i>project</i> | Membuat laporan kegiatan secara lengkap, sistematis, menggunakan bahasa yang mudah dipahami, serta hasil dan kesimpulan benar dan tepat | 5     |
|                        | Membuat laporan kegiatan secara lengkap serta hasil dan kesimpulan benar  | 4     |
|                        | Membuat laporan kegiatan secara sederhana serta hasil dan kesimpulan benar  | 3     |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  | Membuat laporan kegiatan secara sederhana tetapi membutuhkan waktu yang cukup lama | 2 |
|  | Tidak membuat laporan kegiatan   | 1 |

### Form Penilaian *Project*

| No                              | Aspek                              | Nilai |   |   |   |   |
|---------------------------------|------------------------------------|-------|---|---|---|---|
|                                 |                                    | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <b>Perencanaan:</b>             |                                    |       |   |   |   |   |
| 1                               | Topik                              |       |   |   |   |   |
| 2                               | Diagram proyek                     |       |   |   |   |   |
| <b>Pelaksanaan dan Evaluasi</b> |                                    |       |   |   |   |   |
| 1                               | Tahapan proses pelaksanaan Project |       |   |   |   |   |
| 2                               | Monitoring                         |       |   |   |   |   |
| <b>Laporan <i>project</i></b>   |                                    |       |   |   |   |   |
| 1                               | Kelengkapan substansi laporan      |       |   |   |   |   |
| <b>Total skor</b>               |                                    |       |   |   |   |   |

**Pedoman Penskoran:**

📊 Aspek yang diukur : 5

📊 Nilai maksimum :  $5 \times 5 = 25$

**Nilai Akhir = (Jumlah nilai/Nilai maksimum) × 100**

## 4.4 INSTRUMEN PENILAIAN PSIKOMOTOR

Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
 Indikator : .....  
 Materi ajar : .....  
 Kelas/Semester : .....  
 Kelompok : .....  
 Nama *Project* : .....

| No | Rincian Tugas Kinerja  | Nilai Acuan | Nilai Asesmen Oleh Dosen |
|----|--|-------------|--------------------------|
| 1  | <b>Merangkai Alat:</b>   |             |                          |
|    | Terampil merangkai alat sesuai gambar termasuk mengatur posisi statif  | 5           |                          |
|    | Kurang tahu susunan alat yang benar                                    | 3           |                          |
|    | Tidak melakukan apa-apa  | 0           |                          |
| 2  | <b>Menggunakan Alat:</b>   |             |                          |
|    | Cekatan tetapi tetap hati-hati mengganti beban                         | 5           |                          |
|    | Kurang cekatan atau kurang hati-hati mengganti beban                   | 3           |                          |
|    | Tidak mengerjakan apa-apa  | 0           |                          |
| 3  | <b>Mengamati:</b>  |             |                          |
|    | Membaca penunjukan angka pada alat ukur dengan posisi yang benar       | 5           |                          |
|    | Membaca penunjukan angka pada alat ukur dengan posisi yang tidak benar | 3           |                          |
|    | Tidak mengerjakan apa-apa  | 0           |                          |
| 4  | <b>Membuat kesimpulan:</b>   |             |                          |
|    | Membuat kesimpulan yang benar dan dengan bahasa yang mudah dipahami    | 5           |                          |
|    | Membuat kesimpulan yang kurang benar                                   | 3           |                          |
|    | Tidak membuat apapun   | 0           |                          |

Nilai psikomotorik mahasiswa

 Skor maksimum = 20

**Nilai Akhir = (Jumlah nilai/20) × 100**

## 4.5 INSTRUMEN PENILAIAN AFEKTIF

Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
 Indikator : .....  
 Materi ajar : .....  
 Kelas/Semester : .....  
 Kelompok : .....  
 Nama *Project* : .....

### Petunjuk Pengisian

| Komponen yang dinilai | Kriteria   | Nilai |
|-----------------------|--|-------|
| Bertanya              | Sopan, koheren dengan materi, kritis, dan bermutu                      | 5     |
|                       | Sopan, koheren dengan materi, kurang kritis, dan bermutu               | 4     |
|                       | Sopan, koheren dengan materi, kritis, dan kurang bermutu               | 3     |
|                       | Sopan, koheren dengan materi, kurang kritis, dan kurang bermutu        | 2     |
|                       | Sopan, tidak koheren dengan materi, tidak kritis, dan tidak bermutu    | 1     |
| Mengemukakan pendapat | Pendapat sopan, logis, tepat, dan tidak berbelit-belit                 | 5     |
|                       | Pendapat sopan, logis, tepat, dan kurang dipahami                      | 4     |
|                       | Pendapat sopan, logis, tepat, dan benar tapi kurang tepat              | 3     |
|                       | Pendapat sopan, logis, tepat, dan tidak benar                          | 2     |
|                       | Pendapat sopan, tidak logis, tepat, dan tidak benar                    | 1     |
| Menanggapi pendapat   | Sopan, argumentatif, logis, tepat, dan tidak berbelit-belit            | 5     |
|                       | Sopan, argumentatif, logis, tepat, dan berbelit-belit                  | 4     |
|                       | Sopan, argumentatif, logis, dan kurang tepat                           | 3     |
|                       | Sopan, argumentatif, logis, tepat, dan tidak tepat                     | 2     |
|                       | Sopan, tidak argumentatif, tidak logis, dan tidak tepat                | 1     |
| Mengambil kesimpulan  | Cekatan, tegas, isi keputusan logis, dan benar                         | 5     |
|                       | Cekatan, tegas, isi keputusan logis, dan kurang benar                  | 4     |
|                       | Cekatan, tegas, isi keputusan logis, dan tidak benar                   | 3     |
|                       | Cekatan, tegas, isi keputusan tidak logis, dan tidak benar             | 2     |
|                       | Tidak cekatan, tidak tegas, isi keputusan tidak logis, dan tidak benar | 1     |

## Form Penilaian Afektif

### Petunjuk:

Untuk setiap penilaian afektif berikut ini, beri penilaian ( $\surd$ ) atas penilaian afektif mahasiswa menggunakan skala berikut ini dengan berpedoman pada petunjuk pengisian di atas:

| No | Rincian penilaian afektif | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | Keterangan |
|----|---------------------------|---|---|---|---|---|------------|
| 1  | Bertanya                  |   |   |   |   |   |            |
| 2  | Mengemukakan pendapat     |   |   |   |   |   |            |
| 3  | Menanggapi pendapat       |   |   |   |   |   |            |
| 4  | Menarik kesimpulan        |   |   |   |   |   |            |

### Rubrik Penilaian Afektif

 1 - 7 : Rendah

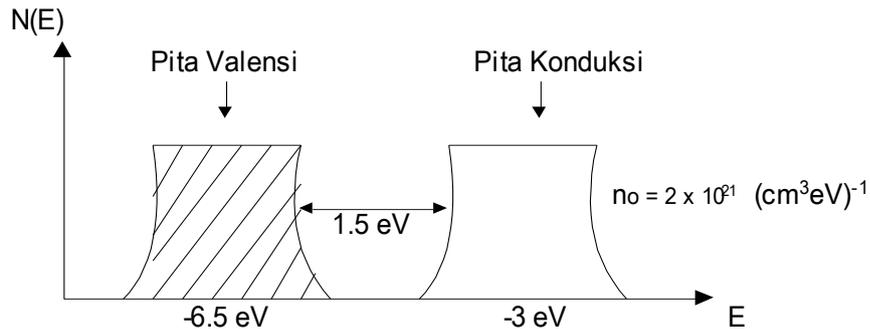
 8 - 14 : Sedang

 15 - 20 : Tinggi

## 4.6 INSTRUMEN PENILAIAN KOGNITIF

### Soal :

1. Tinjau suatu semikonduktor intrinsik dengan fungsi rapat keadaan  $N(E)$  seperti yang ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :
  - a. Dimana tingkat energi Fermi terhadap pita valensi dan pita konduksi ?.
  - b. Hitung kerapatan elektron dalam pita konduksi pada temperatur kamar ?.



2. Sebuah SK Intrinsik (kristal Si) didoping dengan  $10^{16}$  atom/cm<sup>3</sup> Arsenik (As). Tentukan konsentrasi pembawa dan tingkat energi Fermi pada temperatur kamar dan gambarkan diagram energinya!
3. Kristal Silikon dengan energi gap  $\epsilon_G = 1.14$  eV, massa efektif hole diambil  $m_h = 0.3m$  dan massa efektif elektron  $m_e = 0.2m$ 
  - a. Turunkan pernyataan untuk fungsi  $f(T)$  dalam hukum aksi massa :

$$np = f(T)$$

dimana n dan p konsentrasi elektron dan hole, serta T suhu. (Gunakan

$$\int_0^{\infty} x^{\frac{1}{2}} e^{-x} dx = \left( \frac{\pi}{4} \right)^{\frac{1}{2}} )$$

- b. Konsentrasi  $N_D$  dari donor pentavalent As harus ditambahkan untuk menghasilkan konduktivitas ekstrinsik  $10^4$  kali lebih besar dari konduktivitas intrinsiknya pada temperatur kamar ? (abaikan pengotor akseptor).

### Kriteria Penilain:

- 90 – 100 : Pemahamannya *baik sekali*
- 70 – 89 : Pemahamannya *baik*
- 50 – 69 : Pemahamannya *cukup*
- 30 – 49 : Pemahamannya *kurang*
- 0 – 29 : Pemahamannya *kurang sekali*

## 5. BAHAN AJAR

### 1. KERANGKAN BAHAN AJAR

1.1 SAMPUL DEPAN BAHAN AJAR

1.2 KATA PENGANTAR

1.3 DAFTAR ISI

1.4 DAFTAR GAMBAR

1.5 DAFTAR TABEL

1.6 SUSUNAN BAB

|  |             |
|--|-------------|
|   | BAB 1 ..... |
|   | BAB 2 ..... |
|   | BAB 3 ..... |
|   | BAB 4 ..... |
|   | BAB 5 ..... |
|   | BAB 6 ..... |
|   | BAB 7 ..... |
|  | dst         |

1.7 DAFTAR PUSTAKA

1.8 KUNCI JAWABAN

1.9 GLOSARIUM

2. CONTOH SALAH SATU BAB DALAM BAHAN (BUKU) AJAR



Dalam bab ini akan dibicarakan terkait kontribusi vibrasi kisi terhadap sifat-sifat termal padatan yang diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu:

1. Sifat-sifat yang bisa dijelaskan dengan pendekatan harmonik, yaitu kapasitas panas.
2. Sifat-sifat yang tidak bisa dijelaskan tanpa meninjau efek-efek tak-harmonik (*anharmonic*), yaitu konduktivitas termal dan ekspansi termal

### 5.1 KAPASITAS PANAS KISI BERDASARKAN TINJAUAN KLASIK

Kontribusi terbesar terhadap kapasitas panas dalam zat padat berasal dari vibrasi kisi, elektron konduksi dalam logam dan orde dalam material magnetik. Berdasarkan tinjauan klasik, energi dalam padatan didefinisikan sebagai:

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_v \quad (5.1)$$

dimana  $\varepsilon_s, \varepsilon_v$  menyatakan energi dari kisi statik dan energi vibrasi padatan.

Energi ekui-partisi klasik dari vibrasi atom dinyatakan sebagai  $k_B T$  pada temperatur  $T$ ,  $k_B$  konstanta Boltzmann yang menghasilkan energi vibrasi total  $3Nk_B T$  jika terdapat  $N$  atom dalam padatan. Sehingga persamaan (5.1) dapat dinyatakan sebagai:

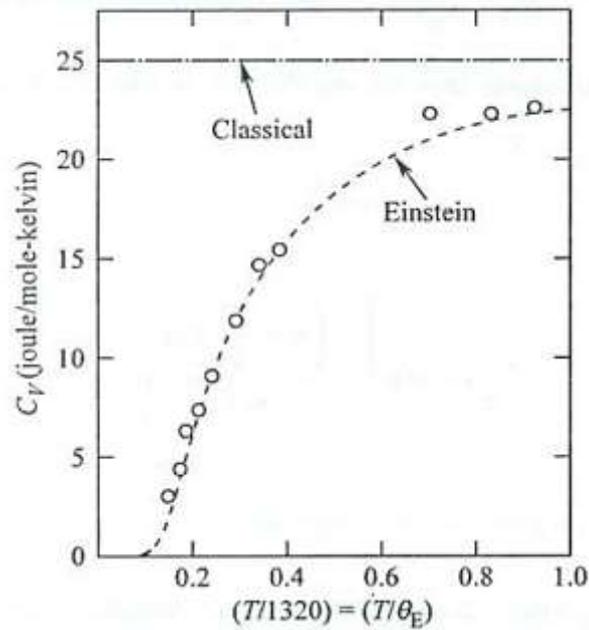
$$\varepsilon = \varepsilon_s + 3Nk_B T \quad (5.2)$$

Pada saat  $T = 0$ , berlaku  $\varepsilon = \varepsilon_s$  yang tidak melibatkan energi titik nol yang bersesuaian dengan pernyataan dari Fisika Klasik yang tidak mengenal konsep gerak titik nol. Kapasitas panas didefinisikan sebagai:

$$C_V = \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)_V = 3Nk_B \quad (5.3)$$

$$C_V = 3Nk_B \quad (5.4)$$

Nilai kapasitas panas hasil pengukuran eksperimen merujuk pada kapasitas panas pada tekanan tetap ( $C_P$ ). Akan tetapi untuk padatan harmonik berlaku ( $C_P = C_V$ ) karena perbedaan antara keduanya diketahui bergantung pada kuadrat koefisien temperatur ekspansi linear yang bernilai nol untuk kristal harmonik. Hal ini dapat ditunjukkan selanjutnya bahwa ekspansi padatan terjadi karena gerak an-harmonik dari atom.



Gambar 5.1 Perbandingan antara kurva hasil eksperimen dengan kurva teoritik Einstein untuk kapasitas molar intan dengan  $\theta_E = 1320$  K dengan garis mendatar diberikan oleh Hukum Dulong-Petit.

Persamaan (5.4) mengindikasikan kapasitas panas yang diturunkan dari Hukum Dulong-Petit (1869) yang menyatakan bahwa kapasitas panas adalah konstan untuk padatan dan tidak bergantung temperatur. Hasil eksperimen untuk kapasitas panas mendekati nilai ini pada saat temperatur tinggi dan setelahnya hampir konstan, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.1. Hukum Dulong-Petit gagal dalam menjelaskan variasi kapasitas panas terhadap temperatur. Kapasitas panas padatan mengalami penurunan ke titik nol pada saat temperatur mendekati 0 K. Kegagalan dari Hukum Dulong-Petit selanjutnya akan diperbaiki dengan pendekatan Teori Kuantum, terutama dalam menjelaskan konduktivitas termal dan ekspansi termal padatan.

## 5.2 TEORI KUANTUM KAPASITAS PANAS KISI

Pada bagian ini akan dijelaskan prosedur dalam menyusun struktur dalam menghitung kapasitas panas kisi menggunakan Teori Kuantum. Vibrasi kisi merupakan gambaran kuantisasi pada teori ini, maka bentuk kapasitas panas fonon dari suara lebih tepat dibandingkan model konvensional. Perhitungan kapasitas panas fonon akan ditinjau dengan melakukan evaluasi energi termal rata-rata yang diperlukan dalam memahami spektrum vibrasi padatan.

### 5.2.1 Energi Termal Rata-Rata Dari Osilator Harmonik

Tingkat energi osilator harmonik kuantum (telah didefinisikan pada BAB 4) diberikan oleh:

$$\varepsilon_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega \quad (5.5)$$

Dimana  $\omega$  menyatakan frekuensi angular osilator. Energi termal rata-rata osilator  $\varepsilon$  dalam keseimbangan termal pada temperatur  $T$  dapat ditulis sebagai:

$$\varepsilon = \sum_n p_n \varepsilon_n \quad (5.6)$$

dengan  $p_n$  menyatakan probabilitas untuk menemukan osilator pada tingkat energi  $\varepsilon_n$  yang dinyatakan sebagai Distribusi Boltzmann:

$$p_n = \exp\left(-\frac{\varepsilon_n}{k_B T}\right) \quad (5.7)$$

Konstanta proporsionalitas memastikan bahwa osilator berada pada tingkat yang diperbolehkan, sehingga:

$$\sum_{n=0}^{\infty} p_n = 1 \rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} p_0 \exp\left(-\frac{(n + \frac{1}{2})\hbar\omega}{k_B T}\right) = 1 \quad (5.8)$$

dimana  $p_0$  menyatakan konstanta proporsionalitas, selanjutnya

$$\begin{aligned} p_0 \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{2k_B T}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{\hbar\omega n}{k_B T}\right) &= 1 \\ p_0 &= \left(\frac{\hbar\omega}{2k_B T}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)\right) \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$p_0 = \exp\left(-\frac{n\hbar\omega}{k_B T}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)\right) \quad (5.10)$$

Substitusikan  $p_n$  dari persamaan (5.10) ke persamaan (5.6), diperoleh

$$\varepsilon(\omega, T) = \left(1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)\right) \hbar\omega \sum_{n=0}^{\infty} \left(n + \frac{1}{2}\right) \exp\left(-\frac{n\hbar\omega}{k_B T}\right)$$

Misalkan  $\exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) = x$ , diperoleh:

$$\varepsilon(\omega, T) = (1 - x)\hbar\omega \left(\sum_{n=0}^{\infty} (nx^n) + \frac{1}{2(1-x)}\right) = \frac{1}{2}\hbar\omega + (1-x)\hbar\omega \sum_{n=0}^{\infty} (nx^n) \quad (5.11)$$

Oleh karena:

$$\sum_{n=0}^{\infty} (x^n) = \frac{1}{(1-x)} \quad (5.12)$$

Diferensiasikan persamaan (5.12) dan selanjutnya kalikan kedua sisi dengan  $x$ , maka diperoleh:

$$\sum_{n=0}^{\infty} (nx^n) = \frac{1x}{(1-x)^2} \quad (5.13)$$

Dari persamaan (5.13) dan (5.11) diperoleh:

$$\varepsilon(\omega, T) = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1}\right) \hbar\omega \quad (5.14)$$

$$\varepsilon(\omega, T) = \left(\langle n \rangle + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega \quad (5.15)$$

dengan:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{\exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1} \quad (5.16)$$

Dengan membandingkan persamaan (5.15) dengan (4.41) menunjukkan bahwa  $\langle n \rangle$  menyatakan hunian (*occupancy*) fonon. Selain itu, fungsi distribusi Plank diperoleh dari radiasi osilator. Contoh di atas, menunjukkan fakta bahwa vibrasi kisi terkuantisasi dengan cara yang sama dengan osilator radiasi. Dengan demikian

keberadaan  $\langle n \rangle$  menyatakan hunian fonon dalam tingkat energi  $\varepsilon_n$  yang diharapkan sebagai jumlah ekspektasi fonon dalam keadaan energi  $\varepsilon_n$  osilator pada keadaan setimbang termal pada temperatur  $T$ .

Perhitungan energi termal total dari padatan secara tidak langsung. Secara praktis dilakukan dengan membuat kurva disperse yang menyediakan informasi bermanfaat dari sejumlah mode per satuan interval frekuensi. Informasi tersebut dikenal dengan rapat keadaan (*density of states*) yang membicarakan tentang energi termal total yang diperoleh dari metode alternatif didasarkan pada asumsi yang ekstrim.

### 5.2.2 Model Einstein

Einstein mengasumsikan bahwa seluruh atom dalam padatan ( $N$ ) bervibrasi dengan frekuensi sama secara independent. Dengan kata lain, frekuensi vibrasi seluruh atom dengan mode normal  $3N$  dan atom-atom berosilasi secara independent satu sama lain. Einstein menyatakan bahwa osilator harmonik atomik adalah sama dengan osilator radiasi dari Teori Planck tentang radiasi benda hitam dan mengalami kuantisasi tingkat energi pada garis paralel:

$$\varepsilon_n = n\hbar\omega \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (5.17)$$

dimana  $\varepsilon_n$  menyatakan energi vibrasi dari osilator pada keadaan eksitasi ke- $n$ . Dengan mengacu pada Persamaan (5.15), energi termal rata-rata padatan untuk polarisasi tunggal mode normal adalah sebanding dengan  $N\hbar\omega\langle n \rangle$ . Faktor  $\frac{1}{2}\hbar\omega$  untuk titik energi nol tidak diketahui dalam model Einstein sebagai faktor yang diperlukan dalam Mekanika Kuantum yang diformulasikan dalam 20 tahun kemudian. Oleh karena itu, ketidaksesuaian ini tidak berpengaruh pada nilai kapasitas panas karena  $C_V = (\partial\varepsilon/\partial T)_V$  dan faktor kelalaian (*omitted factor*) bukan merupakan fungsi dari temperatur.

Selanjutnya, model Einstein dari energi termal (atau energi internal) dari padatan mengandung  $N$  atom yang dinyatakan dengan:

$$\varepsilon = 3N\hbar\omega\langle n \rangle \quad (5.18)$$

yang meliputi energi vibrasi untuk seluruh vibrasi dalam mode normal.

Kapasitas panas fonon dinyatakan dalam bentuk:

$$C_V = \left( \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial V} \right)_V = 3Nk_B \left( \frac{\hbar\omega}{k_B T} \right)^2 \frac{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)}{\left(\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1\right)^2} \quad (5.19)$$

Plot persamaan di atas ditunjukkan pada Gambar 5.1 untuk intan yang menunjukkan nilai-nilai yang berbeda untuk setiap temperatur. Hal ini menunjukkan kesesuaian antara kurva teori dengan hasil eksperimen pada temperatur tinggi. Keseluruhan tinjauan mengindikasikan terdapat kesesuaian antara teori dan eksperimen untuk seluruh jangkauan temperatur seperti yang diharapkan, terutama untuk temperatur rendah. Nilai dari  $C_V$  pada limit temperatur tinggi dapat dievaluasi dengan persamaan (5.19), yaitu  $3Nk_B$  dengan klasik diberikan oleh Hukum Dulong-Petit. Pada limit temperatur rendah, mengalami penurunan sebesar  $\exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)$  dan menurun sampai nol pada saat  $T = 0$  K. Nilai eksperimen juga mendekati nol ketika  $T \rightarrow 0$  K. Selanjutnya, pencapaian terbesar yang dihasilkan oleh Model Einstein pada kemampuannya untuk mendemonstrasikan secara cepat penurunan kapasitas panas menuju nol ketika temperatur  $T = 0$  K. Seperti halnya yang ditunjukkan pada Gambar 5.1 sebagai hasil eksperimen adalah penurunan secara cepat dibandingkan secara eksponensial. Kurva menunjukkan kesesuaian pada ketergantungannya terhadap  $T^3$  dalam daerah temperatur rendah. Untuk setiap padatan terdapat karakteristik temperatur dimana model bekerja dan dibawah temperatur ini model gagal. Temperatur ini disebut dengan Temperatur Karakteristik Einstein dan didefinisikan sebagai:

$$\theta_E = \frac{\hbar\omega_E}{k_B} \quad (5.20)$$

dimana  $\omega_E$  menyatakan frekuensi karakteristik Einstein.

Kelemahan Model Einstein pada temperatur rendah merupakan kekurangan dari model ini. Model ini secara fisis tidak realistis sebab seluruh mode vibrasi berlaku untuk seluruh frekuensi kecuali seluruh atom dalam padatan bervibrasi dengan cara yang sama dan independent satu sama lainnya. Pergerakan dari atom-atom penghubung selalu memiliki kecenderungan berkorelasi sebab gaya kopel di dalam padatan. Oleh karena itu, kekurangannya terletak pada asumsi dasar yang menjadi dasar model ini. Dalam upaya menjelaskan perilaku temperatur rendah pada kapasitas

panas fonon, Debye meletakkan pendekatan lain yang mampu menginterpolasi skema ini untuk menghitung kontribusi efektif dari spektrum frekuensi padatan. Model Debye cukup sukses untuk yang dinyatakan dalam bentuk Hukum  $T^3$  Debye untuk menjelaskan data kapasitas panas pada temperatur rendah.

### 5.2.3 Rapat Keadaan Fonon

Diketahui bahwa rapat keadaan dari mode normal digunakan sebagai prasyarat untuk menentukan energi termal padatan. Tinjau sebuah kubus padatan periodik dengan sisi  $L$ . Misalkan terdapat  $N^3$  sel primitif di dalam volume kubus, dengan menerapkan syarat batas periodik (diberikan oleh Persamaan (4.5)) pada sel 3D, maka:

$$\exp i(k_x x + k_y y + k_z z) = \exp i(k_x(x + L) + k_y(y + L) + k_z(z + L)) \quad (5.21)$$

dimana  $(x, y, z)$  menyatakan koordinat kartesian dari kisi padatan. Persamaan (5.21) akan valid jika persyaratan ini dipenuhi:

$$k_x, k_y, k_z = 0, \pm \frac{2\pi}{L}, \pm \frac{4\pi}{L}, \dots, \frac{N\pi}{L} \quad (5.22)$$

Persamaan (5.22) mirip dengan Persamaan (4.9) untuk kasus 1D.

Himpunan pada persamaan (5.22) menunjukkan bahwa terdapat satu nilai yang diijinkan dari  $k$  dalam volume  $(2\pi/L)^3$  dalam ruang- $k$ . Jumlah nilai-nilai  $k$  yang diijinkan per satuan volume ruang- $k$  dinyatakan sebagai:

$$\left(\frac{L}{2\pi}\right)^3 = \frac{V}{(2\pi)^3} \quad (5.23)$$

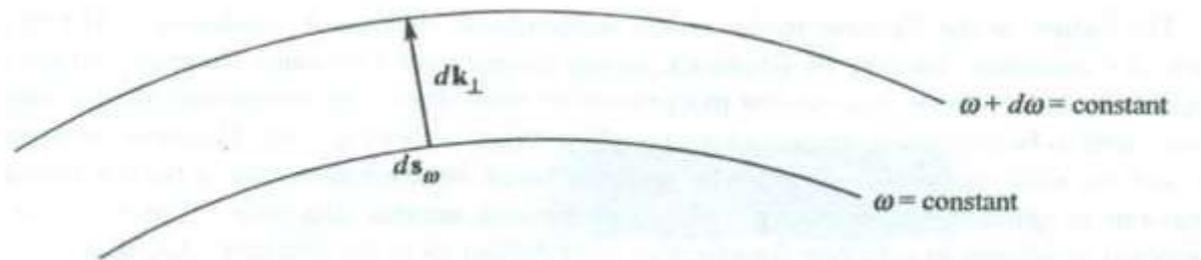
dimana  $V$  menyatakan volume kristal. Jika representasikan kerapatan nilai  $k$  yang diijinkan atau kerapatan mode fonon dengan  $D(\omega)$ , jumlah mode yang terletak pada interval frekuensi  $\omega$  dan  $\omega + d\omega$  dinyatakan sebagai:

$$D(\omega)d\omega = \frac{V}{(2\pi)^3} \times (\text{volume yang terlindungi permukaan } - k, \omega(\mathbf{k}) = \text{konstan dan } \omega(\mathbf{k}) + d\omega = \text{konstan}) \quad (5.24)$$

$$D(\omega)d\omega = \frac{V}{(2\pi)^3} \int_{\omega}^{\omega+d\omega} d^3k$$

Misalkan  $dS_\omega$  menunjukkan sebagai elemen kecil permukaan dari  $\omega(\mathbf{k}) = \text{konstan}$  dan  $d\mathbf{k}_\perp$  sebagai vektor yang tegak lurus terhadapnya, seperti ditunjukkan pada Gambar (5.2) yang menyentuh permukaan  $\omega(\mathbf{k}) + d\omega = \text{konstan}$ , maka:

$$D(\omega)d\omega = \frac{V}{(2\pi)^3} \int_{\omega(\mathbf{k})=\text{konstan}} dS_\omega \cdot d\mathbf{k}_\perp \quad (5.25)$$

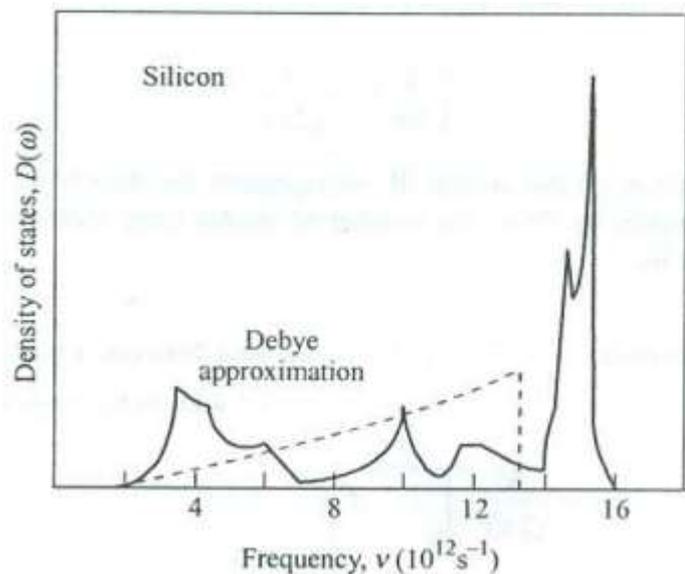


Gambar 5.2 Daerah berdekatan dengan tingkat energi konstan antara  $\omega(\mathbf{k}) = \text{konstan}$  dan  $\omega(\mathbf{k}) + d\omega = \text{konstan}$  yang terhubung dengan vektor  $d\mathbf{k}_\perp$  tegak lurus terhadap elemen permukaan  $dS_\omega$  dengan permukaan energi terendah

Jika diketahui  $d\omega = |\text{grad}_{\mathbf{k}}\omega|d\mathbf{k}_\perp$ , maka:

$$D(\omega)d\omega = \frac{V}{(2\pi)^3} d\omega \int_{\omega(\mathbf{k})=\text{konstan}} \frac{dS_\omega}{|\text{grad}_{\mathbf{k}}\omega|} \quad (5.26)$$

$$D(\omega) = \frac{V}{(2\pi)^3} \int_{\omega(\mathbf{k})=\text{konstan}} \frac{dS_\omega}{|\text{grad}_{\mathbf{k}}\omega|} \quad (5.27)$$



Gambar 5.3 Prilaku rapat keadaan fonon pada silikon, untuk medium isotropik dari bahan elastik kontinum untuk  $\theta_D = 640$  K.

Turunan frekuensi dari rapat keadaan memiliki singularitas (disebut singularitas van Hove) pada titik dimana kecepatan grup bernilai nol atau tangen dari kurva dispersi adalah horizontal. Untuk kristal 1D merupakan kasus khusus, dimana rapat keadaan  $D(\omega)$  itu sendiri singular. Variasi rapat keadaan fonon terhadap frekuensi untuk bahan Si ditunjukkan pada Gambar 5.3.

#### 5.2.4 Model Debye

Pada Model Debye, sebuah kristal dinyatakan sebagai medium continuum elastik dengan kecepatan konstan ( $c = \omega/k$ ). Tinjauan dilakukan terhadap ketiga cabang akustik dengan kecepatan bunyi untuk gelombang longitudinal dan akustik. Dalam kasus ini permukaan  $\omega(\mathbf{k}) = \text{konstan}$  adalah sferis dan kecepatan  $|\text{grad}_{\mathbf{k}}\omega|$  adalah sama dengan kecepatan bunyi. Misalkan  $c_i$  menyatakan kecepatan bunyi pada cabang  $i$ . Sehingga persamaan (5.27) menjadi:

$$D(\omega) = \int_{\omega(\mathbf{k})=\text{konstan}} dS_{\omega} = 4\pi k^2 \quad (5.28)$$

Menggunakan Persamaan (5.28) hubungan untuk rapat keadaan pada Persamaan (5.27) dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned} D_i(\omega) &= \frac{V}{2\pi^2} \cdot \frac{k^2}{c_i} \\ D_i(\omega) &= \frac{V}{2\pi^2} \cdot \frac{\omega^2}{c_i^3} \end{aligned} \quad (5.29)$$

Rapat keadaan fonon total diberikan oleh:

$$D(\omega) = \frac{V}{2\pi^2} \left( \frac{1}{c_L^3} + \frac{2}{c_T^3} \right) \quad (5.30)$$

Dimana  $c_L$  dan  $c_T$  menyatakan kecepatan gelombang transversal dan longitudinal.

Debye menempatkan suatu cut-off pada limit atas frekuensi untuk memastikan bahwa gelombang cukup panjang untuk dilewatkan secara halus pada kristal yang selanjutnya dikatakan sebagai elastik kontinum. Frekuensi cut-off dinyatakan sebagai  $\omega_D$ . Fungsi rapat keadaan pada model in diplot sebagai fungsi frekuensi untuk Silikon pada Gambar 5.3. pada nilai  $\omega_D$  terjadi penurunan dari nilai maksimum

menuju nol yang menghasilkan cut-off yang jelas. Energi termal total kristal dalam keadaan setimbang, yaitu energi internal  $U(T)$  dinyatakan sebaga:

$$U(T) = \int_0^{\omega_D} D(\omega)\varepsilon(\omega, T)d\omega \quad (5.31)$$

dimana  $\varepsilon(\omega, T)$  menyatakan energi termal rata-rata yang tersimpan pada mode frekuensi  $\omega$  pada temperatur  $T$ .

Substitusi untuk  $D(\omega)$  dari persamaan (5.30) dalam (5.31) dihasilkan:

$$U(T) = \frac{V}{2\pi^2} \left( \frac{1}{c_L^3} + \frac{2}{c_T^3} \right) \int_0^{\omega_D} \omega^2 \varepsilon(\omega, T) d\omega \quad (5.32)$$

Kapasitas fonon dinyatakan sebagai:

$$C_V(T) = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \frac{V}{2\pi^2} \left( \frac{1}{c_L^3} + \frac{2}{c_T^3} \right) \int_0^{\omega_D} \omega^2 \left( \frac{\partial}{\partial T} \varepsilon(\omega, T) \right) d\omega \quad (5.33)$$

Frekuensi cut-off Debye diterapkan pada kondisi yang menunjukkan jumlah total mode atau keadaan yang sama dengan  $3N$ , dimana  $N$  menyatakan jumlah atom-atom dalam kristal, dimana:

$$\int_0^{\omega_D} D(\omega) d\omega = 3N \quad (5.34)$$

$$\frac{V}{2\pi^2} \left( \frac{1}{c_L^3} + \frac{2}{c_T^3} \right) \int_0^{\omega_D} \omega^2 d\omega = 3N$$

$$\frac{V}{2\pi^2} \left( \frac{1}{c_L^3} + \frac{2}{c_T^3} \right) = \frac{9N}{\omega_D^3} \quad (5.35)$$

dengan menggunakan persamaan (5.35) dan ambil nilai  $\varepsilon(\omega, T)$  sebagai  $\langle n \rangle \hbar \omega$ , maka dari persamaan (5.33) diperoleh:

$$C_V(T) = \frac{9N}{\omega_D^3} \frac{\partial}{\partial T} \int_0^{\omega_D} \frac{\hbar \omega^3}{\exp(\hbar \omega / k_B T) - 1} d\omega \quad (5.36)$$

Model continuum Debye lebih relevan pada temperatur rendah, dimana hanya frekuensi rendah yang dapat tereksitasi dan oleh karena itu, gelombang dengan panjang gelombang besar yang diberikan. Selanjutnya, temperatur karakteristik Debye  $\theta_D$ , diberikan oleh:

$$\theta_D = \frac{\hbar\omega_D}{k_B} \quad (5.37)$$

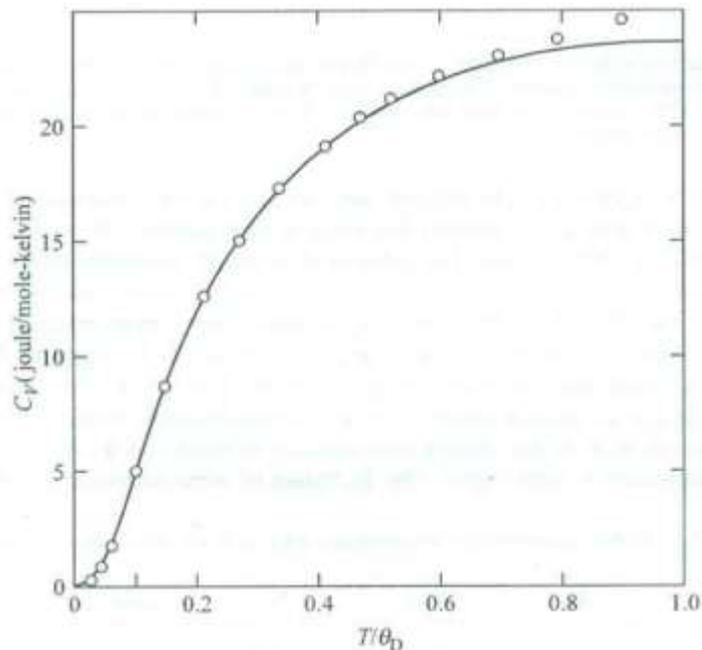
Menggunakan persamaan (5.37) dan ambil  $\hbar\omega/k_B T = x$  pada persamaan (5.36), maka diperoleh:

$$C_V(T) = 9Nk_B \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \frac{\partial}{\partial T} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (5.38)$$

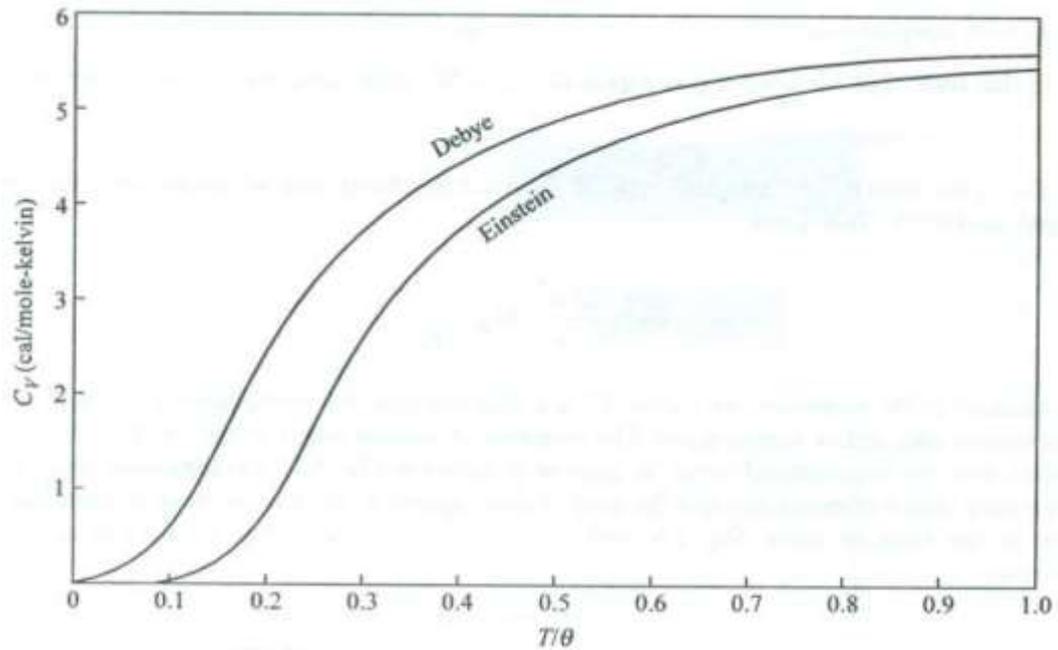
Prilaku kapasitas panas fonon pada limit temperatur ekstrim dapat disimpulkan dari persamaan (5.38), sebagai berikut:

- Pada temperatur tinggi berlaku  $T \gg \theta_D$   
 Pada limit  $k_B T \gg \hbar\omega_D$ , dimana  $C_V$  yang dinyatakan pada persamaan (5.38) mendekati nilai klasiknya  $3Nk_B$ .
- Pada temperatur rendah berlaku  $T \ll \theta_D$   
 Limit atas pada integral persamaan (5.38) mendekati tidak berhingga dan diperoleh nilai integral sebesar  $4\pi^4/15$ , sehingga:

$$C_V(T) = \frac{12\pi^4}{5} Nk_B \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \quad (5.39)$$



Gambar 5.4 Kurva Debye untuk kapasitas panas Yttrium untuk  $\theta_D = 200$  K, Hasil eksperimen (bulatan kosong) menunjukkan nilai di atas kurva Debye untuk temperatur tinggi.



Gambar 5.5 Perbandingan kapasitas panas menurut Model Debye dan Model Einstein. Dalam Model Debye, penurunannya kapasitas panas lebih cepat pada temperatur rendah. Kurva telah dinormalisasikan mendekati model klasik (Dulong-Pettit) sekitar 5.96 cal/mole-K untuk temperatur tinggi. Nilai  $\theta$ , baik  $\theta_D$  maupun  $\theta_E$  tergantung pada sudut pandang kurva tersebut ditinjau.

Hubungan yang dinyatakan dalam persamaan (5.39) merujuk pada hukum  $T^3$  yang menyatakan kebergantungan pada temperatur untuk kondisi dengan temperatur rendah. Variasi kapasitas panas fonon pada Model Debye dengan hasil eksperimen untu Yttrium ditunjukkan pada Gambar 5.4. Hasil studi perbandingan pada daerah dengan temperatur rendah mendemonstrasikan bahwa terdapat penurunan kapasitas panas pada kurva Debye lebih cepat dibandingkan dengan Model Einstein (Gambar 5.5) dan bersesuaian dengan kurva hasil eksperimen yang dikarakterisasi dengan perilaku  $T^3$ .

Sesuai dengan model Debye, Hukum  $T^3$  diharapkan valid pada jangkauan temperatur  $T \leq 0.1\theta_D$ . Akan tetapi hasil eksperimen menyarankan jangkauan lebih rendah lagi, yaitu pada nilai  $T \leq \theta_D/50$ . Hasil sukses dari model Debye secara luas dapat diterima ketika berangkat dari prediksi teoritis perilaku pengukuran yang lebih akurat pada temperatur rendah. Temperatur karakteristik  $\theta_D$  menentukan secara lengkap kapasitas panas fonon dari padatan yang berperan penting dari Model

Debye. Nilai  $\theta_D$  biasanya diestimasi dengan pengukuran nilai kapasitas panas yang dinyatakan dengan persamaan (5.39). Pada hukum  $T^3$ ,  $\theta_D$  dinyatakan sebagai suatu konstanta yang dianggap tidak realistis karena variasi nilai  $\theta_D$  diestimasi pada jangkauan temperatur rendah. Sebagai contoh, untuk NaCl pada pendinginan dari 20 K menjadi 10 K, nilai  $\theta_D$  meningkat sekitar 20 K; sementara untuk Lithium mengalami penurunan sebesar 28 K ketika temperatur menurun dari 30 K menjadi 15 K.

Sebagai perbandingan, Tabel 5.1 menunjukkan kapasitas panas fonon padatan dengan temperatur karakteristik  $\theta_D$  dari beberapa bahan.

Tabel 5.1 Temperatur karakteristik Debye  $\theta_D$  dalam K untuk beberapa bahan

| Padatan | $\theta_D$ | Padatan | $\theta_D$ | Padatan | $\theta_D$ |
|---------|------------|---------|------------|---------|------------|
| Li      | 344        | Hg      | 71.9       | C       | 2230       |
| Na      | 158        | Pb      | 105        | Si      | 645        |
| Cs      | 38         | Fe      | 467        | Ge      | 374        |
| In      | 108        | Ni      | 450        | ZnS     | 315        |
| Te      | 153        | Mo      | 450        | LiF     | 732        |
| Cu      | 343        | W       | 400        | LiCl    | 422        |
| Ag      | 225        | Ar      | 93         | NaCl    | 321        |
| Au      | 165        | Kr      | 72         | KCl     | 235        |

### 5.3 EFEK-EFEK ANHARMONIK

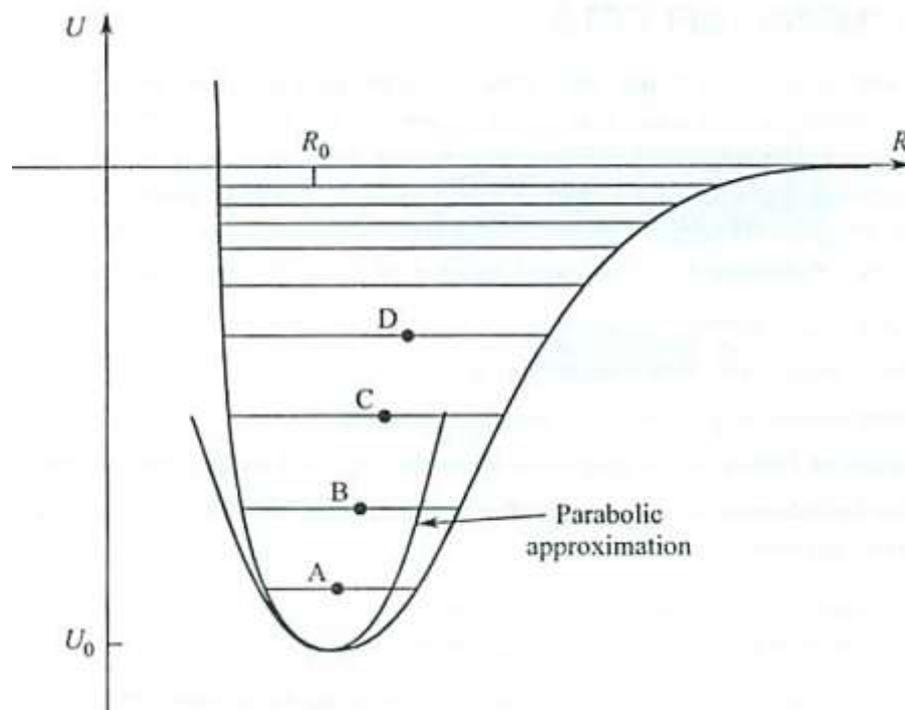
Berkaitan dengan vibrasi kristal, pendekatan harmonik merupakan sangat cocok untuk diterapkan, meskipun hanya membahas untuk padatan dengan temperatur di bawah titik lelehnya. Beberapa fenomena yang tidak bisa dijelaskan, ketika pendekatan harmonik tidak bisa diterapkan tanpa menggunakan pendekatan relaksasi (*anharmonic*), diantaranya:

1. Ekspansi termal;
2. Konduktivitas termal untuk nilai terbatas;
3. Ketergantungan konstanta elastik pada temperatur;
4. Kegagalan kapasitas termal Debye untuk mencapai nilai klasik pada temperatur tinggi ( $T \gg \theta_D$ );

5. Lebar garis atau lebar pengukuran dari puncak fonon pada pola hamburan tak-elastik neutron.

Alasan kegagalan dari pendekatan harmonik dalam menjelaskan terhadap fenomena fisis di atas dijelaskan sebagai berikut:

1. Vibrasi atom-atom bisa dinyatakan sebagai osilasi kecil yang menyebabkan perpindahan atom-atom dari posisi masing-masing pada keadaan setimbang;
2. Ekspansi energi potensial di sekitar nilai setimbangnya tetap dipertahankan.



Gambar 5.6 Kurva energi potensial berlebih didasarkan pada model Lennard-Jones untuk kristal real. Peningkatan jarak interatomik  $R$  yang besar pada energi tinggi (tereksitasi pada temperatur tinggi) menghasilkan ekspansi termal. Dengan  $R_0$  merupakan jarak interatomik pada keadaan dasar (*ground state*), oleh karena anharmonisitas, vibrasi kuantum (Jarak antar tingkat vibrasi) tidak bernilai konstan dan meningkat terhadap energi.

Validitas dari asumsi pertama tetap menjadi pertanyaan pada temperatur tinggi dimana amplitude vibrasi besar. Oleh karena perpindahan menjadi lebih besar, maka perpindahan pada orde tinggi dapat dinyatakan sebagai kuadratik dalam bentuk ekspansi energi potensial, sehingga asumsi ini tidak relevan lagi. Hal ini diindikasikan

oleh bidang dari kurva energi potensial pada jarak interatomik besar (Gambar 5.6) yang bersifat tidak simetrik yang merupakan deviasi dari harmonik alami. Fenomena ini dapat dimengerti bahwa atom-atom tidak dapat berosilasi seperti osilator harmonik yang independent untuk kristal nyata sebab gerak dari atom-atom yang saling terhubung satu sama lain. Secara umum, kehadiran fenomena tidak harmonik (*anharmonicity*) untuk memastikan derajat vibrasi padatan. Oleh karena itu, koreksi terhadap fenomena ini dilakukan dengan memasukan tidak-harmonik dalam perhitungan.

Efek tak-harmonik diperhitungkan ketika ekspansi energi potensial terpotong, sehingga penurunan bentuk konstanta kesetimbangan dinyatakan sebagai:

$$U(x) = fx^2 - gx^3 - hx^4 \quad (5.40)$$

dimana  $x$  merupakan deviasi dari pemisahan keseimbangan pada nol absolut dan seluruh koefisien  $f, g$  dan  $h$  positif.

Bentuk pertama dari persamaan (5.40) merupakan komponen harmonik dan dua yang lainnya mengacu pada efek tak-harmonik. Bentuk kubik menyatakan gaya tolak tak-simetri dari atom-atom dan pangkat empat (*quartic*) menyatakan vibrasi halus pada amplitude besar. Aplikasi potensial tak-harmonik berkaitan dengan fenomena kedua seperti yang dijelaskan pada contoh sebelumnya. Sementara itu, ekspansi termal mengacu pada sifat kesetimbangan, dimana konduktivitas termal dikenal sebagai fenomena transport.

### 5.3.1 Ekspansi Termal

Fakta menunjukkan bahwa padatan mengalami ekspansi ketika mengalami pemanasan. Pada pendekatan harmonik, seluruh atom mengalami vibrasi disekitar titik setimbangnya secara simetrik sempurna (*parabolic*) dari jarak interatomik. Seperti halnya ditunjukkan pada Gambar 5.6, yang diturunkan menggunakan potensial Lennard-Jones untuk padatan sebenarnya, bersesuaian terjadi pada saat jangkauan eksitasi termal rendah yang bersesuaian dengan temperatur rendah. Sehingga dapat dikatakan bahwa pendekatan harmonik hanya berlaku ketika temperatur rendah.

Dinding potensial menghasilkan keadaan asimetrik untuk jarak interatomik besar (Gambar 5.6) terjadi pada energi besar. Jarak interatomik rata-rata pada beberapa energi vibrasi diambil pada peningkatan orde yang ditandai dengan titik-titik A, B, C, dan D. Nilai-nilai ini menyatakan titik-titik pada peningkatan orde seperti ditunjukkan dengan kecenderungan pergeseran kearah nilai lebih besar relatif terhadap jarak pisah kesetimbangan rata-rata  $R_0$  dari keadaan dasarnya. Selanjutnya, hal ini menjadi lebih penting bahwa pada temperatur tinggi ketika keadaan vibrasi lebih tinggi dipenuhi populasinya, padatan akan menunjukkan ekspansi. Jangkauan frekuensi vibrasi padatan dapat mengalami eksitasi oleh energi termal. Argumen ini menjelaskan bahwa ekspansi termal padatan. Oleh karena sifat-sifat yang menyertao keadaan tak-harmonik dari kurva energi potensial, sehingga ekspansi termal menandakan kehadiran tak-harmonik pada vibrasi atomik. Mengacu ke persamaan (5.40) ekspansi termal dihitung dalam bentuk perpindahan rata-rata  $\langle x \rangle$  dari atom-atom padatan, seperti ditunjukkan pada persamaan:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$$

dengan mengabaikan bentuk  $h$ , maka:

$$\langle x \rangle = \frac{3g\langle x^2 \rangle}{2f} \quad (5.41)$$

Jika perpindahan kuadrat rata-rata dihitung secara klasik menggunakan pendekatan harmonik, sehingga diperoleh:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \exp(-fx^2/k_B T) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-fx^2/k_B T) dx} = \frac{\frac{k_B T}{4f} \sqrt{\frac{\pi}{f/k_B T}}}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{f/k_B T}}} = \frac{k_B T}{2f} \quad (5.42)$$

Substitusi persamaan (5.42) pada persamaan (5.41), diperoleh:

$$\langle x \rangle = \frac{3gk_B T}{4f^2} \quad (5.43)$$

Logam merupakan konduktor panas dan listrik yang baik, dimana energi ditransport melalui elektron bebas, tetapi hal ini tidak bisa ditafsirkan bahwa konduktivitas termal tergantung pada jumlah elektron bebas yang ada. Beberapa

isolator, seperti Safir kristalin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan kuartz ( $\text{SiO}_2$ ) memiliki konduktivitas termal tinggi dibandingkan dengan tembaga pada temperatur rendah. Konduktivitas termal maksimum Safir sekitar  $200 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$  dibandingkan tembaga pada  $100 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Hasil observasi menunjukkan banyak melibatkan banyak faktor pembawa lainnya sebagai tambahan elektron bebas untuk mentransport panas. Pembawa tersebut dalam bentuk fonon yang dikonfirmasi dengan teori yang menjelaskan data eksperimen.

#### 5.4 SOAL-SOAL YANG DIPECAHKAN

1. Cahaya tampak dengan panjang gelombang  $5000 \text{ \AA}$  mengalami penghamburan oleh kristal dengan indeks bias  $n = 1.5$ . Hitung frekuensi maksimum dari fonon yang dibangkitkan dan perubahan fraksional frekuensi dari radiasi yang datang, jika diberikan kecepatan rambat bunyi dalam kristal adalah  $5000 \text{ ms}^{-1}$ .

##### Penyelesaian:

Frekuensi fonon yang diemisikan dinyatakan dalam persamaan:

$$\omega = \frac{2v_s\omega_{fonon}n}{c} \sin \frac{\phi}{2}$$

Frekuensi radiasi datang  $\omega_{fonon}$  dihitung menggunakan:

$$\omega_{fonon} = 2\pi\nu = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2\pi \frac{3 \times 10^8}{5000 \times 10^{-10}} = 3.77 \times 10^{15} \text{ rad/s}$$

Pada saat  $\omega$  maksimum, maka:

$$\sin \frac{\phi}{2} = 1$$

Dengan  $\phi$  menyatakan sudut hamburan

$$\omega = \frac{2v_s\omega_{fonon}n}{c} = \frac{2 \times 5000 \times 3.77 \times 10^{15} \times 1.5}{3 \times 10^8}$$

$$\omega = 1.86 \times 10^{11} \text{ rad/s}$$

Jika  $\omega'_{foton}$  menyatakan frekuensi foton terhambur, maka:

$$\omega_{fonon} - \omega'_{foton} = \omega$$

Sehingga, perubahan fraksional frekuensi foton yang datang adalah:

$$\frac{\omega_{fonon} - \omega'_{foton}}{\omega_{fonon}} = \frac{\omega}{\omega_{fonon}} = \frac{1.86 \times 10^{11}}{3.77 \times 10^{15}} = 5 \times 10^{-5}$$

2. Hitung temperatur Einstein dari Cesium jika diketahui frekuensi Einstein adalah  $1.69 \times 10^{12}$  Hz.

**Penyelesaian:**

Diketahui frekuensi Einstein ( $f_E$ ) =  $1.69 \times 10^{12}$  Hz, konstanta Planck  $h = 6.62 \times 10^{-34}$  J.s, Konstanta Boltzmann  $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ , maka dengan menggunakan persamaan:

$$\theta_E = \frac{hf_E}{k_B} = \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 1.69 \times 10^{12}}{1.38 \times 10^{-23}} = 81 \text{ K}$$

3. Temperatur Debye untuk dua padatan ionik isomorfus adalah 246 K dan 188 K. Jika kapasitas panas kisi dari padatan ionik pertama pada 10 K adalah 0,0263 J/mole-K. Hitung kapasitas panas padatan ionik kedua pada temperatur sama.

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $C_V = 0.0263 \text{ Jmole}^{-1}\text{K}^{-1}$ , Temperatur Debye 1 ( $T_D$ )<sub>1</sub> = 246 K, ( $T_D$ )<sub>2</sub> = 188 K, sehingga jika diketahui pada temperatur rendah:

$$C_V \propto \left(\frac{T}{T_D}\right)^3$$

Sehingga pada temperatur sama, diperoleh:

$$\frac{(C_V)_2}{(C_V)_1} = \left[\frac{(T_D)_1}{(T_D)_2}\right]^3$$

$$(C_V)_2 = (C_V)_1 \left[\frac{(T_D)_1}{(T_D)_2}\right]^3 = 0.0263 \times \left(\frac{246}{188}\right)^3 = 0.0588 \text{ J mole}^{-1}\text{K}^{-1}$$

4. Pada temperatur sangat rendah, kapasitas panas spesifik suatu bahan bervariasi terhadap temperatur setiap Hukum  $T^3$  Debye. Jika temperatur Debye adalah 425 K, maka tentukan kuantitas panas yang diperlukan untuk meningkatkan temperatur dari 4 mole bahan dari 27 °C menjadi 40 °C.

**Penyelesaian:**

Diketahui : Jumlah moles = 4 mole, Temperatur Debye ( $T_D$ ), Temperatur  $T_1 = 27$  °C ( $27 + 273 = 300$  K),  $T_2 = 40 + 273 = 313$  K, Konstanta Gas universal ( $R$ ) = 8.31 J mole<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>.

Pada temperatur rendah, sesuai dengan Teori Debye maka panas spesifik diberikan oleh:

$$C_V(T) = \frac{12\pi^4}{5} R \left( \frac{T}{T_D} \right)^3$$

Kuantitas panas yang diperlukan untuk meningkat 4 mole pada dari temperatur  $T_1$  temperatur  $T_2$ :

$$dQ = nC_V dT = n \frac{12\pi^2}{5} R \left( \frac{T}{T_D} \right)^3 dT$$

Kuantitas panas total diperoleh dengan cara mengintegrasikannya terhadap  $T$ :

$$Q = \int_{300}^{313} n \frac{12\pi^2}{5} R \left( \frac{T}{T_D} \right)^3 dT = 4 \left( \frac{12}{5} \right) \times \frac{(3.14)^2 (8.31)}{(425)^2} \times \frac{1}{4} ((313)^4 - (300)^4)$$

$$Q = 3834.6 \text{ J mole}^{-1} \text{K}^{-1}$$

5. Diketahui bahwa jari-jari ion-ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  adalah 0.98 dan 1.81 Å. Modulus Young untuk NaCl dalam arah [100] adalah  $5 \times 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$ . Dengan asumsi bahwa perluasan arah [100] yang dihasilkan kontraksi diabaikan dalam arah tegak lurus, maka hitung panjang gelombang yang mana radiasi elektromagnetik sangat kuat dipantulkan oleh kristal NaCl. Massa atom Na dan Cl masing-masing 23 dan 35.5.

**Penyelesaian:**

Frekuensi sangat kuat dipantulkan oleh kristal ionik dinyatakan sebagai:

$$\omega^2 = 2\beta \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right)$$

Dimana  $m$  dan  $M$  menyatakan massa masing-masing ion dan  $\beta$  konstanta gaya. Karena pelebaran arah [100] yang menghasilkan kontraksi yang diabaikan dalam arah tegak lurus, maka:

$$\beta = aY$$

Dimana  $a$  menyatakan jarak interatomik dan  $Y$  menyatakan modulus Young.

$$\omega^2 = 2aY \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right)$$

Jarak interatomik sepanjang arah [100] dari NaCl dinyatakan sebagai penjumlahan jari-jari ion  $\text{Ca}^+$  dan  $\text{Cl}^-$ :

$$\omega^2 = 2(0.98 + 1.81) \times 10^{-10} \times 5 \times 10^{10} \times \left( \frac{1}{23} + \frac{1}{35.5} \right) \times \frac{1}{1.67 \times 10^{-27}}$$

$$\omega = 3.46 \times 10^{13} \text{ rad/s}$$

Panjang gelombang elektromagnetik yang kuat dipantulkan oleh NaCl adalah:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi \times 3 \times 10^{10}}{3.46 \times 10^{13}} = 5.45 \times 10^{-3} \text{ m}$$

6. Emas memiliki struktur yang sama dengan struktur tembaga. Jika diketahui kecepatan rambat bunyi di dalam emas adalah  $2100 \text{ ms}^{-1}$  dan dalam tembaga  $3800 \text{ ms}^{-1}$ . Jika temperatur Debye tembaga adalah  $348 \text{ K}$ , maka tentukan temperatur Debye dalam emas. Kerapatan emas dan tembaga masing-masing adalah  $1.93 \times 10^4 \text{ kgm}^{-3}$  dan  $8960 \text{ kgm}^{-3}$  dengan berat atom keduanya masing-masing  $197.0$  dan  $63.54 \text{ amu}$ .

**Penyelesaian:**

Temperatur Debye,  $\theta_D$  dinyatakan sebagai:

$$\theta_D = \frac{h\nu_D}{k_B}$$

Dimana  $\nu_D$  menyatakan frekuensi Debye yang diberikan oleh:

$$\nu_D^3 = \frac{9N}{4\pi V} \left( \frac{1}{\nu_l^3} + \frac{2}{\nu_t^3} \right)$$

Dimana  $N$  menyatakan jumlah atom yang terdapat pada pada kristal dengan volume  $V$ , serta  $\nu_l$  dan  $\nu_t$  menyatakan kecepatan gelombang suara longitudinal dan transversal pada kristal. Dengan mengganti  $\nu_l$  dan  $\nu_t$  dengan  $\nu_s$ , maka diperoleh:

$$\nu_D = \nu_s \left( \frac{3N}{4\pi V} \right)^{1/3}$$

$$\theta_D = \frac{h}{k_B} \nu_s \left( \frac{3N}{4\pi V} \right)^{1/3}$$

Tinjau untuk 1 mole atom:

$$\theta_D = \frac{h\nu_s}{k_B} \left( \frac{3N_a\rho}{4\pi M} \right)^{1/3}$$

Sehingga:

$$(\theta_D)_{Cu} = \frac{h}{k_B} (\nu_s)_{Cu} \left( \frac{3N_a\rho_{Cu}}{4\pi M_{Cu}} \right)^{1/3}$$

$$(\theta_D)_{Au} = \frac{h}{k_B} (\nu_s)_{Au} \left( \frac{3N_a\rho_{Au}}{4\pi M_{Au}} \right)^{1/3}$$

$$(\theta_D)_{Au} = (\theta_D)_{Cu} \frac{(v_s)_{Au}}{(v_s)_{Cu}} \left( \frac{M_{Cu} \rho_{Au}}{M_{Au} \rho_{Cu}} \right)^{1/3}$$

$$(\theta_D)_{Au} = 348 \left( \frac{2100}{3800} \right) \left( \frac{63.54 \times 1.93 \times 10^4}{197.0 \times 8960} \right)^{1/3} = 170 \text{ K}$$

7. Temperatur Debye untuk Intan adalah 2000 K. Hitung kecepatan rata-rata bunyi didalam Intan, jika diberikan kerapatan dan mass atomik Intan masing-masing  $3500 \text{ kgm}^{-3}$  dan 12 amu. Jika dikerahui jarak interatomik  $1.54 \text{ \AA}$ , perkirakan frekuensi mode dominan dari kisi vibrasi:

**Penyelesaian:**

Temperatur Debye diberikan dalam bentuk:

$$\theta_D = \frac{h}{k_B} v_s \left( \frac{3N_e \rho}{4\pi M} \right)^{1/3}$$

$$v_s = \frac{k_B \theta_D}{h} \left( \frac{4\pi M}{3N_e \rho} \right)^{1/3}$$

Diberikan:  $\theta_D = 2000 \text{ K}$ ,  $M = 12 \text{ kg}$ ,  $\rho = 3500 \text{ kgm}^{-3}$  jadi,

$$v_s = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 2000}{6.626 \times 10^{-34}} \left( \frac{4\pi 12}{3 \times 6.023 \times 10^{26} \times 3500} \right)^{1/3} = 1.24 \times 10^4 \text{ ms}^{-1}$$

Orde nilai dari panjang gelombang fonon dominan pada temperatur  $T (T \ll \theta_D)$  diperkirakan dari hubungan:

$$\lambda_D = \left( \frac{\theta_D}{T} \right) a = \left( \frac{2000}{298} \right) \times 1.54 \times 10^{-10} = 1.03 \times 10^{-9} \text{ m}$$

Frekuensi yang berkaitan dengan vibrasi kisi dinyatakan sebagai:

$$v_d = \frac{v_s}{\lambda_D} = \frac{1.2 \times 10^4}{1.03 \times 10^{-9}} = 1.16 \times 10^{13} \text{ Hz}$$

## 5.5 EVALUASI

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan istilah-istilah di bawah ini:
  - a. Fonon
  - b. Foton
  - c. Temperatur Debye
  - d. Vibrasi kristal

2. Jelaskan perbedaan dan persamaan utama pada kuantisasi fonon dan foton!
3. Hitung frekuensi cut-off untuk kisi linear monoatomik jika diketahui kecepatan rambat bunyi dan jarak interatomik adalah  $3 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$  dan  $3 \times 10^{-10} \text{ m}$ .
4. Jelaskan apa yang dimaksud dengan kapasitas panas pada volume konstan dan kapasitas panas kisi. Jelaskan bagaimana dengan batasan dari Hukum Dulong-Petit.
5. Turunkan suatu pernyataan untuk temperatur yang mana energi termal kisi sama dengan energi titik nol dari Model Einstein.
6. Tinjau hubungan dispersi pada persamaan (4.4) kisi atomik 1D dengan  $N$  buah atom. Tunjukkan bahwa rapat mode normalnya diberikan oleh:

$$D(\omega) = \frac{2N}{\pi} \frac{1}{(\omega_m^2 - \omega^2)^{1/2}}$$

7. Gunakan pendekatan Debye untuk menunjukkan kapasitas panas dari sebuah kisi linear monoatomik pada temperatur  $T \ll \theta_D$  sebanding dengan  $T/\theta_D$ . Jika diketahui temperatur efektif Debye 1D dinyatakan sebagai:

$$\theta_D = \frac{\hbar\omega}{k_B} = \frac{\pi\hbar v_S}{k_B a}$$

dimana  $v_S$  menyatakan kecepatan efektif bunyi dan  $a$  menyatakan jarak interatomik.

8. NaCl mempunyai struktur yang sama dengan KCl. Jika diketahui temperatur Debye NaCl dan KCl masing-masing adalah 281 K dan 230 K, serta kapasitas panas NaCl pada 5 K adalah  $1.6 \times 10^{-2} \text{ J mole}^{-1}\text{K}^{-1}$ , maka perkirakan kapasitas panas KCl pada 5 K dan 3 K.
9. Temperatur Debye untuk dua padatan ionik isomorfus adalah 281 dan 230 K. Jika diketahui kapasitas panas kisi dari padatan ionik pertama pada 5 K adalah  $0.016 \text{ Jmole}^{-1}\text{K}^{-1}$ , selanjutnya estimasikan kapasitas panas untuk padatan kedua pada temperatur 5 K.
10. Pada temperatur rendah, panas spesifik dari garam dapur bervariasi dengan temperatur mengikuti Hukum Debye  $T^3$ . Jika diketahui temperatur Debye sekitar 375 K, maka tentukan kuantitas panas yang diperlukan untuk meningkatkan temperatur 2 mole garam dapur dari  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  menjadi  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## LAMPIRAN

### 1. CHECK LIST LEMBAR KONSULTASI

Perguruan Tinggi : Universitas Mulawarman  
Fakultas : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Program Studi : Fisika  
Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
Kode Mata Kuliah : 190704603W034  
Semester/sks : VI (Enam) / 3 SKS  
Mata Kuliah Prasyarat : Fisika Kuantum, Fisika Modern, Listrik Magnet  
Nama Dosen : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si  
Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si

| No. | TANGGAL | MATERI   | KOMENTAR | PARAF |
|-----|---------|--|----------|-------|
| 1   |         | Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL) Program Studi |          |       |
| 2   |         | Capaian Pembelajaran Lulusan Pada Mata Kuliah    |          |       |
| 3   |         | Sub CPMK   |          |       |
| 4   |         | Analisis Capaian Pembelajaran                    |          |       |
| 5   |         | Rencana Pembelajaran Semester (RPS)              |          |       |
| 6   |         | Rencana Pelaksanaan Pembelajaran (RPP)           |          |       |
| 7   |         | Kontrak Perkuliahan                              |          |       |
| 8   |         | Rencana Asesmen & Evaluasi (RA&E)                |          |       |
| 9   |         | Contoh Tes Uraian                                |          |       |
| 10  |         | Jawaban  |          |       |

| No. | TANGGAL | MATERI                                  | KOMENTAR | PARAF |
|-----|---------|---|----------|-------|
| 11  |         | Pedoman Penskoran Soal Uraian           |          |       |
| 12  |         | Pedoman Penskoran Soal Uraian           |          |       |
| 13  |         | Rancangan Evaluasi Program Pembelajaran |          |       |
| 14  |         | Rubrik Penilaian Makalah                |          |       |
| 15  |         | Form Penilaian Makalah                  |          |       |
| 16  |         | Instrumen Penilaian <i>Project</i>      |          |       |
| 17  |         | Instrumen Penilaian Psikomotor          |          |       |
| 18  |         | Instrumen Penilaian Afektif             |          |       |
| 19  |         | Instrumen Penilaian Kognitif            |          |       |
| 20  |         | Bahan Ajar                              |          |       |
| 21  |         | Dokumen yang Direkonstruksi             |          |       |

## **2. DOKUMEN YANG DIREKONSTRUKSI**

## RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)

Perguruan Tinggi : Universitas Mulawarman  
Fakultas : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Program Studi : Fisika  
Mata Kuliah : Fisika Zat Padat  
Kode Mata Kuliah : 190704603W034  
Semester/sks : VI (Enam)/3 SKS  
Mata Kuliah Prasyarat: -  
Nama Dosen : Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si. dan Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si.

### Deskripsi Mata Kuliah Fisika Zat Padat

Fisika Zat Padat diperlukan untuk mengetahui berbagai sifat dan perilaku zat yang berada pada fase padat. Sifat dan perilaku zat mampu dianalisis dengan mempertimbangkan unsur-unsur internal yang berupa kesetangkupan dan keberkalaan kedudukan atom-atom dan gugus atom dalam ruang.

### Capaian Pembelajaran Lulusan

#### A. Sikap

1. Bertakwa kepada Tuhan Yang Maha Esa dan mampu menunjukkan sikap religious. (RS1)
2. Menginternalisasi nilai, norma dan etika akademik. (RS3)
3. Menunjukkan sikap profesionalisme atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri. (RS10)

#### B. Pengetahuan

1. Menguasai konsep teoritis dan prinsip-prinsip pokok Termodinamika dan Fisika Modern sederhana yang berhubungan dengan zat padat, dan terdefinisi dengan baik. (PP1)

### **C. Keterampilan Umum**

1. Menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan/atau teknologi sesuai bidang keahliannya. (KU1)
2. Mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi ilmu pengetahuan dan teknologi bidang Fisika Zat Padat berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah untuk menghasilkan solusi, gagasan, desain, atau kritik seni serta menyusun deskripsi saintifik hasil kajiannya dalam bentuk skripsi atau laporan tugas akhir. (KU2)
3. Mengambil keputusan secara tepat dalam konteks penyelesaian masalah di bidang Fisika Zat Padat, berdasarkan hasil analisis terhadap informasi dan data yang diperoleh. (KU3)

### **D. Keterampilan Khusus**

1. Mampu merumuskan gejala dan masalah dasar Fisika Zat Padat melalui analisis teoritik dan eksperimen. (KK1)
2. Mampu menghasilkan model fisis yang sesuai dengan hipotesis atau prakiraan dampak dari fenomena yang menjadi subyek pembahasan dalam bidang Fisika Zat Padat. (KK2)
3. Menghasilkan karya ilmiah sains dalam bidang Fisika Zat Padat dan aplikasinya terkait pengelolaan hutan hujan tropis. (KK7)

### **E. Daftar Referensi**

1. Charles Kittel, 1953, Introduction to Solid State Physics, John Wiley, New York
2. Michael C. Martin, 1996, Solid State Physics, John Wiley, New York
3. Chrisman J. R, 1988, Fundamentals of Solid State Physics, John Wiley & Son, New York
4. Nurlaela Rauf, 2008, Fisika Zat Padat, LKPP Unhas, Makassar

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)   | Indikator   | Bahan Kajian (Materi Ajar)   | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara)  | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa  | Kriteria Penilaian   | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|--|---|--|---|--------------|---|--|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)  | (3)   | (4)  | (5)   | (6)          | (7)   | (8)  | (9)                 | (10)      |
| 1           | Mahasiswa harus dapat memiliki wawasan dan pengetahuan tentang ruang lingkup materi fisika zat padat | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan batasan fisika zat padat</li> <li>• Mampu menjelaskan kedudukan fisika zat padat dalam ilmu fisika</li> <li>• Mampu menjelaskan pendekatan yang digunakan dalam fisika zat padat.</li> </ul> | Pendahuluan <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pengantar fisika zat padat</li> <li>• Kedudukan fisika zat padat dalam ilmu fisika</li> <li>• Pendekatan yang digunakan dalam fisika zat padat</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ceramah,</li> <li>- Tanya Jawab,</li> <li>- Diskusi,</li> <li>- Penugasan</li> </ul> | 3 x 50 menit | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mendengarkan penjelasan dosen</li> <li>• Aktif bertanya materi yang kurang jelas</li> <li>• Aktif menjawab pertanyaan dari dosen</li> <li>• Aktif melakukan proses penurunan rumusan, dan mampu menjelaskan makna fisis dari setiap rumusan</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian proses melalui observasi dan penugasan</li> <li>• Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>• Penilaian produk berupa hasil eksplorasi tentang materi yang sedang dibahas</li> <li>• Ketepatan tanggapan/jawaban )</li> <li>• Kedisiplinan (kesungguhan dalam mengikuti perkuliahan, ketepatan waktu pengumpulan tugas)</li> </ul> | 7%                  | 1,2,3,4   |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)   | Indikator   | Bahan Kajian (Materi Ajar)   | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara)   | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa  | Kriteria Penilaian  | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|--|---|--|--|--------------|---|---|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)  | (3)   | (4)  | (5)  | (6)          | (7)   | (8)   | (9)                 | (10)      |
| 2           | Mahasiswa harus dapat mengingat Kembali konsep-konsep termodinamika yang berhubungan dengan fisika zat padat | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan hukum-hukum termodinamika</li> <li>• Mampu menjelaskan besaran terukur dari suatu sistem ditinjau melalui persamaan-persamaan termodinamika</li> </ul> | Tinjauan Singkat Termodinamika: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pengertian dasar termodinamika</li> <li>• Persamaan keadaan</li> <li>• Hukum-hukum</li> <li>• Energi bebas</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Ceramah,</li> <li>– Diskusi,</li> <li>– Tanya-jawab,</li> <li>– Model pembelajaran : TTW</li> </ul> | 3 x 50 menit | <b>Think</b><br>1. Membaca materi dari modul secara mandiri<br><b>Talk</b><br>2. Menyampaikan kepada teman sekelas<br>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas<br><b>Write</b><br>4. Menuliskan hasil diskusi<br>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi<br>6. Latihan menyelesaikan soal | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian proses melalui observasi dan penugasan</li> <li>• Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>• Keaktifan</li> <li>• Kedisiplinan</li> <li>• Kuis (indikator: ketepatan jawaban)</li> <li>• Kertas Tugas</li> </ul> | 7%                  | 1,3,4     |
| 3           | Mahasiswa  | Mahasiswa harus :   | Struktur Kristal   | – Ceramah,   | 3 x 50       | <b>Think</b>  | • Penilaian proses  | 7%                  | 1,3,4     |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)                       | Indikator  | Bahan Kajian (Materi Ajar)     | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajaran)  | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa   | Kriteria Penilaian  | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|--|--|--------------------------------|--|--------------|--|---|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)  | (3)  | (4)                            | (5)  | (6)          | (7)  | (8)   | (9)                 | (10)      |
|             | harus dapat memahami keteraturan struktur Kristal zat padat. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu mendefinisikan struktur kristal</li> <li>• Mampu menjelaskan secara umum mengenai kisi Kristal, basis, dan sel satuan.</li> </ul> |                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Diskusi,</li> <li>– Tanya-jawab,</li> <li>– Model pembelajaran : TTW</li> </ul> | menit        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Membaca materi dari modul secara mandiri</li> </ol> <p><b>Talk</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Menyampaikan kepada teman sekelas</li> <li>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas</li> </ol> <p><b>Write</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Menuliskan hasil diskusi</li> <li>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi</li> </ol> | <p>melalui observasi dan penugasan</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>• Penilaian tertulis melalui kuis</li> <li>• Kemampuan komunikasi dan matematis dalam melakukan presentasi</li> <li>• Keaktifan</li> <li>• Kedisiplinan</li> </ul> |                     |           |
| 4           | Mahasiswa diharapkan dapat memiliki wawasan dan pengetahuan  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan kisi Kristal serta kesimetrisannya</li> <li>• Mampu</li> </ul>  | Kisi Kristal dan Indeks Miller | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Diskusi,</li> <li>– Tanya-jawab,</li> <li>– Model pembelajaran : TTW</li> </ul> | 3 x 50 menit | <p><b>Think</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Membaca materi dari modul secara mandiri</li> </ol> <p><b>Talk</b></p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan</li> <li>• Penilaian sikap melalui observasi</li> </ul>  | 7%                  | 1,3,4     |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)                        | Indikator   | Bahan Kajian (Materi Ajar)                | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajaran)  | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa  | Kriteria Penilaian  | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|---|---|---|--|--------------|---|---|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)   | (3)   | (4)                                       | (5)  | (6)          | (7)   | (8)   | (9)                 | (10)      |
|             | tentang kisi kristal, bidang kristal dan indeks miller.       | menjelaskan bidang kristal dan indeks miller  |   |  |              | <p>2. Menyampaikan kepada teman sekelas hasil pemahaman</p> <p>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas</p> <p><b>Write</b></p> <p>4. Menuliskan hasil diskusi</p> <p>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi</p> <p>6. Menerima penjelasan tugas</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian jurnal penelitian</li> <li>• Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>• Keaktifan</li> <li>• Kedisiplinan</li> </ul> |                     |           |
| 5           | Mahasiswa dapat mengetahui tentang ketidaksempurnaan yang ada | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu memahami berbagai keadaan fisik pada kristal</li> <li>• Mampu</li> </ul> | Cacat Kristal : Cacat titik, cacat garis. | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Ceramah,</li> <li>– Diskusi,</li> <li>– Tanya-jawab,</li> <li>– Model pembelajaran : TTW</li> </ul> | 3 x 50 menit | <p><b>Think</b></p> <p>1. Membaca materi dari modul secara mandiri</p> <p><b>Talk</b></p> <p>2. Menyampaikan</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan</li> <li>• Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>• Penilaian jurnal</li> </ul>            | 7%                  | 1,4       |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)  | Indikator   | Bahan Kajian (Materi Ajar)          | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara)                                       | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa  | Kriteria Penilaian  | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|---|---|-------------------------------------|--|--------------|---|---|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)   | (3)   | (4)                                 | (5)  | (6)          | (7)   | (8)   | (9)                 | (10)      |
|             | pada kristal atau cacat Kristal.  | menganalisis berbagai jenis cacat (deffect) pada Kristal.   |                                     |  |              | <p>kepada teman sekelas</p> <p>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas</p> <p><b>Write</b></p> <p>4. Menuliskan hasil diskusi</p> <p>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi</p> | <p>penelitian</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>• Keaktifan</li> <li>• Kedisiplinan</li> </ul>  |                     |           |
| 6           | Mahasiswa mampu Memahami konsep energi entaraksi dan menjelaskan gaya-gaya antar atom dalam berbagai struktur kristal | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan energy entraksi dan gaya-gaya antar atom</li> <li>• Mampu menjelaskan munculnya gaya Coulomb</li> <li>• Mampu</li> </ul> | Energi entraksi dan Gaya antar atom | <p>–Ceramah,</p> <p>–Diskusi,</p> <p>–Tanya-jawab,</p> <p>–Model pembelejara<br/>: TTW</p> | 3 x 50 menit | <p><b>Think</b></p> <p>1. Membaca materi dari modul secara mandiri</p> <p><b>Talk</b></p> <p>2. Menyampaikan kepada teman sekelas</p> <p>3. Melakukan diskusi dan</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan</li> <li>• Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>• Penilaian jurnal penelitian</li> <li>• Kemampuan komunikasi dalam melakukan</li> </ul> | 7%                  | 1,4       |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)                                       | Indikator  | Bahan Kajian (Materi Ajar)                               | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara)   | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa  | Kriteria Penilaian  | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|--|--|--|--|--------------|---|---|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)  | (3)  | (4)  | (5)  | (6)          | (7)   | (8)   | (9)                 | (10)      |
|             |  | menjelaskan gaya Tarik menarik yang menimbulkan berbagai jenis ikatan.   |  |  |              | tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas<br><b>Write</b><br>4. Menuliskan hasil diskusi<br>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi   | presentasi<br>• Keaktifan<br>• Kedisiplinan<br>• Periksa catatan  |                     |           |
| 7           | Mahasiswa mampu Menjabarkan tentang hamburan gelombang oleh struktur Kristal | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjelaskan fenomena hamburan</li> <li>• Mampu menjelaskan tentang hukum Bragg</li> <li>• Mampu membedakan berbagai jenis hamburan</li> </ul> | Hamburan gelombang oleh struktur Kristal dan Hukum Bragg | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Ceramah,</li> <li>– Diskusi,</li> <li>– Tanya-jawab,</li> <li>– Model pembelajaran : TTW</li> </ul> | 3 x 50 menit | <b>Think</b><br>1. Membaca materi dari modul secara mandiri<br><b>Talk</b><br>2. Menyampaikan kepada teman sekelas<br>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan</li> <li>• Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>• Penilaian jurnal penelitian</li> <li>• Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>• Keaktifan</li> <li>• Kedisiplinan</li> </ul> | 8%                  | 1,4       |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)                                 | Indikator  | Bahan Kajian (Materi Ajar)             | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara)   | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa  | Kriteria Penilaian  | Bobot penilaian (%) | Referensi |  |
|-------------|--|--|--|--|--------------|---|---|---------------------|-----------|--|
| (1)         | (2)  | (3)  | (4)                                    | (5)  | (6)          | (7)   | (8)   | (9)                 | (10)      |  |
|             |  |  |  |  |              | <p><b>Write</b></p> <p>4. Menuliskan hasil diskusi</p> <p>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Periksa catatan</li> </ul>   |                     |           |  |
| 8           | UTS (Ujian Tengah Semester)  |  |  |  |              |   |   | 50%                 |           |  |
| 9           | Mahasiswa mampu menjabarkan masalah kisi resiprok dan difraksi sinar X | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu menjabarkan tentang kisi resiprok</li> <li>• Mampu menjelaskan kaitan kisi resiprok dan difraksi sinar X</li> <li>• Hubungan antara kisi resiprok dan bidang Kristal dari kisi nyata</li> </ul> | Difraksi Sinar X pada struktur kristal | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Ceramah,</li> <li>– Diskusi,</li> <li>– Tanya-jawab,</li> <li>– Model pembelajaran : TTW</li> </ul> | 3 x 50 menit | <p><b>Think</b></p> <p>1. Membaca materi dari modul secara mandiri</p> <p><b>Talk</b></p> <p>2. Menyampaikan kepada teman sekelas</p> <p>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas</p> <p><b>Write</b></p> <p>4. Menuliskan hasil diskusi</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan</li> <li>• Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>• Penilaian jurnal penelitian</li> <li>• Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>• Keaktifan</li> <li>• Kedisiplinan</li> <li>• Jurnal belajar</li> </ul> | 6%                  | 1,4       |  |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)                       | Indikator   | Bahan Kajian (Materi Ajar)                        | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara)   | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa   | Kriteria Penilaian  | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|--|---|---|--|--------------|--|---|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)  | (3)   | (4)   | (5)  | (6)          | (7)  | (8)   | (9)                 | (10)      |
|             |  |   |   |  |              | 5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi   |   |                     |           |
| 10          | Mahasiswa mampu Memahami tentang getaran termal pada kristal | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mampu mendefenisikan getaran termal pada kristal</li> <li>• Memahami konsep teori kinetik gas</li> <li>• Mampu menjabarkan Hukum Dulong dan petit dalam peristiwa getaran termal Kristal.</li> </ul> | Getaran termal Kristal dan Hukum Dulong dan Petit | <ul style="list-style-type: none"> <li>–Ceramah</li> <li>–Diskusi,</li> <li>–Tanya-jawab,</li> <li>–Model pembelejaraan : TTW</li> </ul> | 3 x 50 menit | <p><b>Think</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Membaca materi dari modul secara mandiri</li> </ol> <p><b>Talk</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2. Menyampaikan kepada teman sekelas</li> <li>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas</li> </ol> <p><b>Write</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Menuliskan hasil diskusi</li> <li>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi</li> </ol> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan</li> <li>• Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>• Penilaian jurnal penelitian</li> <li>• Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>• Keaktifan</li> <li>• Kedisiplinan</li> <li>• Jurnal belajar</li> </ul> | 7%                  | 1         |
| 11          | Mahasiswa  | • Mampu   | Getaran Termal                                    | –Ceramah   | 3 x 50       | <b>Think</b>   | • Penilaian sikap   | 7%                  | 1,4       |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)            | Indikator   | Bahan Kajian (Materi Ajar) | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajaran)         | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa   | Kriteria Penilaian   | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|---|---|----------------------------|---|--------------|--|--|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)   | (3)   | (4)                        | (5)   | (6)          | (7)  | (8)  | (9)                 | (10)      |
|             | memahami dengan baik teori panas jenis kristal    | membedakan panas jenis Kristal menurut teori Einstein dan panas jenis Kristal menurut Debye | Kristal                    | –Diskusi,<br>–Tanya-jawab,<br>–Model pembelajaran : TTW       | menit        | 1. Membaca materi dari modul secara mandiri<br><b>Talk</b><br>2. Menyampaikan kepada teman sekelas<br>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas<br><b>Write</b><br>4. Menuliskan hasil diskusi<br>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi | melalui observasi dan penugasan<br>• Penilaian sikap melalui observasi<br>• Penilaian jurnal penelitian<br>• Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi<br>• Keaktifan<br>• Kedisiplinan<br>• Periksa catatan |                     |           |
| 12          | Mahasiswa mampu menjabarkan masalah dinamika pada | • Mampu Menjelaskan dinamika kisi Kristal pada Kristal linier                               | Dinamika Kisi Kristal      | –Ceramah<br>–Diskusi,<br>–Tanya-jawab,<br>–Model pembelajaran | 3 x 50 menit | <b>Think</b><br>1. Mencari materi dari berbagai sumber tentang materi yang   | • Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan<br>• Penilaian sikap melalui observasi   | 7%                  | 1,4       |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK) | Indikator   | Bahan Kajian (Materi Ajar) | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara) | Waktu | Pengalaman Belajar Mahasiswa  | Kriteria Penilaian   | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|--|-------------|----------------------------|--|-------|---|--|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)                                    | (3)         | (4)                        | (5)  | (6)   | (7)   | (8)  | (9)                 | (10)      |
|             | kisi kristal                           | mono-atomik |                            | : TTW  |       | <p>sedang dipelajari secara mandiri</p> <p><b>Talk</b></p> <p>2. Menyampaikan kepada teman sekelas hasil pencarian</p> <p>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas</p> <p><b>Write</b></p> <p>4. Menuliskan hasil diskusi</p> <p>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi</p> <p>6. Menerima penjelasan tugas pertemuan selanjutnya yaitu menuliskan</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Penilaian jurnal penelitian</li> <li>• Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>• Keaktifan</li> <li>• Kedisiplinan</li> <li>• Periksa catatan</li> </ul> |                     |           |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)                    | Indikator  | Bahan Kajian (Materi Ajar) | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara)  | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa   | Kriteria Penilaian   | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|---|--|----------------------------|---|--------------|--|--|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)   | (3)  | (4)                        | (5)   | (6)          | (7)  | (8)  | (9)                 | (10)      |
|             |   |  |                            |   |              | makalah dan jurnal belajar   |  |                     |           |
| 13          | Mahasiswa mampu menjelaskan masalah dinamika kisi kristal | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mampu Menjelaskan dinamika kisi Kristal diatomik</li> </ul> | Dinamika kisi Kristal      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi,</li> <li>Tanya-jawab,</li> <li>Model pembelajaran : TTW</li> </ul> | 3 x 50 menit | <p><b>Think</b></p> <p>1. Mencari materi dari berbagai sumber tentang materi yang sedang dipelajari secara mandiri</p> <p><b>Talk</b></p> <p>2. Menyampaikan kepada teman sekelas hasil pencarian (mempresentasikan makalah)</p> <p>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas</p> <p><b>Write</b></p> <p>4. Menuliskan hasil</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan</li> <li>Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>Penilaian jurnal penelitian</li> <li>Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>Keaktifan</li> <li>Kedisiplinan</li> <li>Periksa catatan</li> </ul> | 9%                  | 2,3,4     |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)                                   | Indikator   | Bahan Kajian (Materi Ajar) | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara)   | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa  | Kriteria Penilaian  | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|--|---|----------------------------|--|--------------|---|---|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)  | (3)   | (4)                        | (5)  | (6)          | (7)   | (8)   | (9)                 | (10)      |
|             |  |   |                            |  |              | <p>diskusi</p> <p>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi</p> <p>6. Menerima penjelasan tugas pertemuan selanjutnya yaitu menuliskan makalah dan jurnal belajar</p>  |   |                     |           |
| 14          | Mahasiswa mampu menjelaskan dengan baik tentang Pita energy kristal pada | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mampu menganalisis dan menjelaskan mengenai Teorema Bloch</li> </ul> | Teori pita energi          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi,</li> <li>Tanya-jawab,</li> <li>Model pembelejaraan : TTW</li> </ul> | 3 x 50 menit | <p><b>Think</b></p> <p>1. Mencari materi dari berbagai sumber tentang materi yang sedang dipelajari secara mandiri</p> <p><b>Talk</b></p> <p>2. Menyampaikan kepada teman sekelas hasil pencarian (mempresentasik</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan</li> <li>Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>Penilaian jurnal penelitian</li> <li>Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>Keaktifan</li> <li>Kedisiplinan</li> </ul> | 7%                  | 2,3,4     |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)  | Indikator  | Bahan Kajian (Materi Ajar)   | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajaran)  | Waktu        | Pengalaman Belajar Mahasiswa   | Kriteria Penilaian  | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|---|--|--|--|--------------|--|---|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)   | (3)  | (4)  | (5)  | (6)          | (7)  | (8)   | (9)                 | (10)      |
|             |   |  |  |  |              | <p>an makalah)</p> <p>3. Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas</p> <p><b>Write</b></p> <p>4. Menuliskan hasil diskusi</p> <p>5. Menyusun kesimpulan hasil diskusi</p> <p>6. Menerima penjelasan tugas pertemuan selanjutnya yaitu menuliskan makalah dan jurnal belajar</p> |   |                     |           |
| 15          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mahasiswa mampu menjabarkan model Kronig-</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mampu menjelaskan potensi energy pita energy</li> </ul> | Penutup : <ul style="list-style-type: none"> <li>Teori Pita Energi</li> <li>Pengelolaan hutan hujan</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ceramah</li> <li>Diskusi,</li> <li>Tanya-jawab,</li> <li>Model</li> </ul> | 3 x 50 menit | <p><b>Think</b></p> <p>1. Mencari materi dari berbagai sumber tentang</p>  | Kriteria penilaian: <ul style="list-style-type: none"> <li>PAP</li> </ul> Jenis dan Teknik penilaian: | 7%                  | 2,3,4     |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK)  | Indikator   | Bahan Kajian (Materi Ajar)   | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajara) | Waktu | Pengalaman Belajar Mahasiswa   | Kriteria Penilaian   | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|---|---|--|--|-------|--|--|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)   | (3)   | (4)  | (5)  | (6)   | (7)  | (8)  | (9)                 | (10)      |
|             | <p>Penney</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mahasiswa memiliki gambaran mengenai peran fisika khususnya zat padat dalam pengelolaan dan pelstarian hutan hujan tropis</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mampu memahami dan menjabarkan perilaku electron melalui model Kronig-penney</li> <li>Mampu melahirkan ide atau gambaran pengelolaan hutan hujan tropis dalam kaitannya dengan fisika zat padat</li> </ul> | <p>tropis</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pengembangan ide fisika zat padat untuk pelestarian hutan hujan tropis</li> </ul> | <p>pembelejaran : TTW</p>                            |       | <p>materi yang sedang dipelajari secara mandiri</p> <p><b>Talk</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Menyampaikan kepada teman sekelas hasil pencarian (mempresentasikan makalah)</li> <li>Melakukan diskusi dan tanya jawab tentang materi yang sedang dibahas</li> </ol> <p><b>Write</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Menuliskan hasil diskusi</li> <li>Menyusun kesimpulan hasil diskusi</li> <li>Menerima penjelasan tugas</li> </ol> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Penilaian sikap melalui observasi dan penugasan</li> <li>Penilaian sikap melalui observasi</li> <li>Penilaian jurnal penelitian</li> </ul> <p>Kriteria penilaian:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Kemampuan komunikasi dalam melakukan presentasi</li> <li>Keaktifan</li> <li>Kedisiplinan</li> <li>Jurnal belajar</li> <li>Makalah</li> </ul> |                     |           |

| Minggu Ke - | Kemampuan akhir yang diharapkan (CPMK) | Indikator | Bahan Kajian (Materi Ajar) | Strategi Pembelajaran (Metode dan Model Pembelajaran) | Waktu | Pengalaman Belajar Mahasiswa                                      | Kriteria Penilaian | Bobot penilaian (%) | Referensi |
|-------------|--|-----------|----------------------------|---|-------|---|--------------------|---------------------|-----------|
| (1)         | (2)                                    | (3)       | (4)                        | (5)   | (6)   | (7)   | (8)                | (9)                 | (10)      |
|             |  |           |                            |   |       | pertemuan selanjutnya yaitu menuliskan makalah dan jurnal belajar |                    |                     |           |
| 16          | Ujian Akhir Semester (UAS)             |           |                            |   |       |   |                    | 50%                 |           |
|             | Total                                  |           |                            |   |       |   |                    |                     |           |

Skema Penilaian:

- |           |     |
|-----------|-----|
| 1. Afekti | 10% |
| 2. UTS    | 45% |
| 3. UAS    | 45% |

**Mengetahui**  
**Koordinator Program Studi Fisika**

**Dr. Rahmawati Munir, S.Si.,M.Si**  
**NIP. 19801201200604 2 001**

**Samarinda, Desember 2021**  
**Dosen Pengampu MK**

**Dr. Dadan Hamdani, S.Si.,M.Si**  
**NIP.19730223 200012 1 001**