



**SIMULASI EFEK HAMBURAN IMPURITAS TERIONISASI TERHADAP  
DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN DIODA Si PADA VARIASI  
TEMPERATUR OPERASIONAL**

**SKRIPSI**

Oleh

**Maria Kusniawati  
NIM 111810201006**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2015**



**SIMULASI EFEK HAMBURAN IMPURITAS TERIONISASI TERHADAP  
DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN DIODA Si PADA VARIASI  
TEMPERATUR OPERASIONAL**

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Ilmu Fisika (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh  
**Maria Kusniawati**  
NIM 111810201006

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2015**

**PERSEMBAHAN**

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Niswati dan ayahanda Kusno tercinta yang telah melahirkan dan membesarkan serta pengorbanan selama ini;
2. Randhi Nanang Darmawan, S.Si., M.Si yang selalu memotivasi;
3. teman-teman GP '11 yang telah memberi semangat dan dukungan dalam setiap kesulitan;
4. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

**MOTTO**

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.  
Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”  
(Terjemahan QS. Ash-Sharh:5-6)\*)

---

\*) Departemen Agama Republik Indonesia. 2012. *Al-Hadi: Al Qur'an Terjemah Per Kata Latin dan Kode Tajwid*. Jakarta: Penerbit Satu Warna.

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Maria Kusniawati

NIM :111810201006

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Simulasi Efek Hamburan Impuritas Terionisasi Terhadap Distribusi Pembawa Muatan Dioda Si Pada Variasi Temperatur Operasional ” adalah benar-benar hasil karya tulis sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Agustus 2015

Yang menyatakan,

Maria Kusniawati

111810201006

**SKRIPSI**

**SIMULASI EFEK HAMBURAN IMPURITAS TERIONISASI TERHADAP  
DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN DIODA Si PADA VARIASI  
TEMPERATUR OPERASIONAL**

Oleh

Maria Kusniawati

NIM 111810201006

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Endhah Purwandari, S.Si, M.Si

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Edy Supriyanto, S.Si, M.Si

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Simulasi Efek Hamburan Impuritas Terionisasi Terhadap Distribusi Pembawa Muatan Dioda Si pada Variasi Temperatur Operasional” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal:

tempat:

Tim Penguji

Ketua

Sekretaris

Endhah Purwandari, S.Si, M.S.  
NIP 198111112005012001

Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si.  
NIP 196712151998021001

Anggota I

Anggota II

Drs. Yuda C Hariadi, M.Sc., Ph.D  
NIP 196203111987021001

Supriyadi, S.Si., M.Si  
NIP 198204242006041001

Mengesahkan  
Dekan,

Prof. Drs. Kusno, DEA., Ph.D.  
NIP 196101081986021001

## RINGKASAN

**Simulasi Efek Hamburan Impuritas Terionisasi terhadap Distribusi Pembawa Muatan Dioda Si pada Variasi Temperatur Operasional;** Maria Kusniawati; 111810201006; 2015; (64) halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Silikon ialah salah satu bahan semikonduktor yang berasal dari golongan IVA dan tersusun atas atom-atom tunggal berstruktur kristal. Salah satu aplikasi divais semikonduktor adalah dioda Silikon. Dioda terbuat dari persambungan semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Pada temperatur ruang, atom impuritas akan terionisasi dan terjadi interaksi *Coulomb* dengan pembawa muatan setempat. Interaksi inilah yang menyebabkan terjadinya hamburan impuritas terionisasi. Hamburan akibat proses tumbukan antar atom yang terionisasi menyebabkan terjadinya perubahan kecepatan pembawa muatan. Perubahan mobilitas pembawa muatan menyebabkan perubahan difusivitas bahan. Impuritas yang terionisasi akibat adanya perubahan temperatur operasional dan mobilitas pembawa muatan pada dioda Silikon memberikan perubahan pada distribusi pembawa muatan. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan hasil pemodelan profil distribusi pembawa muatan yang dipengaruhi oleh variasi temperatur dan mobilitas pembawa muatan. Hasil simulasi tersebut dibandingkan dengan data kontrol, yaitu data distribusi pembawa muatan yang dipengaruhi oleh variasi temperatur dimana mobilitas muatan dianggap konstan.

Penelitian diawali dengan *entry* data berupa parameter dioda Silikon, geometri dioda, temperatur operasional (T) dan mobilitas pembawa muatan ( $\mu$ ). Temperatur operasional divariasikan dari  $-50^{\circ}\text{C}$  hingga  $200^{\circ}\text{C}$ . Dalam hal ini, besarnya mobilitas pembawa muatan berbanding terbalik dengan peningkatan temperatur. Geometri



dioda Silikon yang disimulasikan memiliki panjang 7  $\mu\text{m}$  dan lebar 5  $\mu\text{m}$ . Metode yang digunakan adalah metode elemen hingga. Metode elemen hingga merupakan suatu metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial dengan beberapa kondisi batas dan membagi suatu domain menjadi subdomain yang disebut *mesh*. Metode elemen hingga dapat mengubah suatu fungsi kontinu menjadi fungsi diskrit, sehingga solusi umum dari suatu persamaan yang diselesaikan tersebut berupa penjumlahan masing-masing elemen. Data yang dimasukkan selanjutnya digunakan untuk mengatur kondisi batas, menyelesaikan persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas. Hasil yang diperoleh berupa data konsentrasi pembawa muatan.

Hasil simulasi variasi temperatur operasional dan mobilitas pembawa muatan menunjukkan bahwa konsentrasi elektron terbesar terdapat pada daerah katoda, kemudian konsentrasi elektron menurun ketika menuju daerah anoda. Penurunan konsentrasi elektron ditandai dengan perubahan warna pada geometri dioda. Namun sebaliknya, konsentrasi *hole* tertinggi berada pada daerah anoda dan menurun ketika menuju daerah katoda. Pengamatan distribusi pembawa muatan dilakukan di daerah katoda, persambungan dan anoda. Pada daerah katoda, seiring bertambahnya temperatur operasional dan menurunnya mobilitas muatan maka konsentrasi elektron meningkat sedangkan konsentrasi *hole* menurun. Hal yang serupa juga terjadi pada konsentrasi elektron dan *hole* dimana mobilitas *hole* konstan. Pada daerah persambungan, konsentrasi *hole* mengalami peningkatan dan konsentrasi elektron menurun baik mobilitas pembawa muatan divariasikan terhadap temperatur maupun dianggap konstan. Pada daerah anoda konsentrasi *hole* menurun akibat adanya perubahan mobilitas *hole* maupun mobilitas *hole* konstan. Konsentrasi elektron pada daerah anoda akibat adanya variasi mobilitas elektron meningkat kecuali pada temperatur 100°C dan 150°C, sedangkan konsentrasi elektron pada daerah anoda dimana mobilitas elektron konstan meningkat kecuali pada temperatur 150°C dan 200°C.

## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan Hidayah-Nya sehingga peneliti dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Simulasi Efek Hamburan Impuritas Terionisasi terhadap Distribusi Pembawa Muatan Dioda Si pada Variasi Temperatur Operasional**”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember. Penyusunan Karya Tulis Ilmiah ini telah mendapatkan bimbingan dan pengarahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Endhah Purwandari S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Dr.Edy Supriyanto S.Si., M.Si selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Drs. Yuda Cahyoargo Hariadi, M.Sc., Ph.D selaku Dosen Penguji I dan Supriyadi S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. teman-teman fisika angkatan 2011 yang telah memberikan semangat;
4. semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Peneliti menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat peneliti harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk semua pihak.

Jember, Agustus 2015

Penulis

**DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xv
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	3
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	4
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
<b>2.1 Material Semikonduktor</b> .....	5
<b>2.2 Klasifikasi Semikonduktor</b> .....	6
2.2.1 Semikonduktor Intrinsik.....	7
2.2.2 Semikonduktor Entrinsik.....	9

<b>2.3 Hamburan Impuritas Terionisasi</b> .....	11
<b>2.4 Persamaan Dasar Divais Semikonduktor</b> .....	14
2.4.1 Persamaan Rapat Arus .....	14
2.4.2 Persamaan Poisson .....	15
2.4.3 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan .....	16
<b>2.5 Dioda</b> .....	17
<b>2.6 Metode Elemen Hingga</b> .....	19
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN</b> .....	23
<b>3.1 Jenis Penelitian</b> .....	23
<b>3.2 Tempat dan Waktu Penelitian</b> .....	23
<b>3.3 Metode Penelitian</b> .....	23
3.3.1 Geometri Dioda Silikon .....	26
3.3.2 Parameter Dioda Silikon .....	26
3.3.3 Pengaturan Kondisi Batas .....	28
3.3.4 Persamaan Poisson dan Kontinuitas .....	29
3.3.5 Pembuatan Grafik Hubungan antara Konsentrasi Pembawa Muatan dan Temperatur .....	30
<b>3.4 Analisis Data</b> .....	31
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	32
<b>4.1 Pemodelan Distribusi Elektron Akibat Peristiwa Hamburan         Impuritas Terionisasi pada Dioda Silikon</b> .....	32
<b>4.2 Pemodelan Distribusi Hole Akibat Peristiwa Hamburan         Impuritas Terionisasi pada Dioda Silikon</b> .....	42
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	52
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	52
<b>5.2 Saran</b> .....	53
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	54
<b>LAMPIRAN</b> .....	57

**DAFTAR GAMBAR**

	Halaman
2.1 Semikonduktor intrinsik.....	7
2.2 Semikonduktor ekstrinsik tipe-n.....	10
2.3 Semikonduktor ekstrinsik tipe-p.....	11
2.4 Grafik muatan terhadap temperatur dengan konsentrasi impuritas yang berbeda.....	12
2.5 Difusi elektron dan <i>hole</i> .....	18
2.6 Geometri dioda Silikon.....	20
3.1 Diagram alir penelitian.....	24
3.2 Diagram alir simulasi.....	25
3.3 Mesh dioda Silikon.....	26
4.1 Hasil simulasi profil distribusi konsentrasi elektron pada temperatur 0°C dengan mobilitas elektron $\mu = 1800 \text{ cm/Vs}$ .....	33
4.2 Hasil simulasi profil distribusi konsentrasi elektron pada temperatur 0°C dengan mobilitas elektron konstan sebesar $\mu = 800 \text{ cm/Vs}$ (kontrol) .....	34
4.3 Grafik hubungan antara temperatur terhadap konsentrasi elektron di daerah katoda.....	37
4.4 Grafik hubungan antara temperatur terhadap konsentrasi elektron di daerah persambungan.....	40
4.5 Grafik hubungan antara temperatur terhadap konsentrasi elektron pada daerah dekat anoda.....	41
4.6 Hasil simulasi profil distribusi konsentrasi <i>hole</i> pada temperatur 0°C dengan mobilitas <i>hole</i> $\mu = 850 \text{ cm/Vs}$ .....	42
4.7 Hasil simulasi profil distribusi konsentrasi <i>hole</i> pada temperatur 0°C dengan mobilitas elektron konstan sebesar $\mu = 200 \text{ cm/Vs}$ (kontrol) .....	43

4.8	Grafik hubungan antara konsentrasi <i>hole</i> terhadap temperatur di daerah katoda.....	47
4.9	Grafik hubungan antara konsentrasi <i>hole</i> terhadap variasi temperatur di daerah persambungan.....	48
4.10	Grafik hubungan antara konsentrasi <i>hole</i> terhadap variasi temperatur di daerah anoda.....	49



**DAFTAR TABEL**

	Halaman
2.1 Bahan semikonduktor dan nilai celah energinya .....	6
3.1 Faktor skala untuk parameter input.....	27
4.1 Konsentrasi elektron akibat hamburan impuritas terionisasi dengan variasi mobilitas muatan.....	35
4.2 Konsentrasi elektron akibat adanya efek hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas muatan dianggap konstan ( $\mu = 800 \text{ cm/Vs}$ ) (data kontrol).....	36
4.3 Konsentrasi <i>hole</i> akibat hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas muatan divariasikan.....	45
4.4 Konsentrasi <i>hole</i> akibat adanya efek hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas pembawa muatan dianggap konstan ( $\mu=200 \text{ cm/Vs}$ ) (data kontrol).....	46

**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
<b>A PROFIL DISTRIBUSI KONSENTRASI ELEKTRON PADA VARIASI TEMPERATUR.....</b>	57
<b>B PROFIL DISTRIBUSI KONSENTRASI <i>HOLE</i> PADA VARIASI TEMPERATUR.....</b>	61



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Silikon merupakan salah satu bahan semikonduktor dasar yang berasal dari golongan IV dan tersusun atas atom-atom tunggal berstruktur kristal. Bahan ini membutuhkan energi minimal 1,1 eV untuk dapat menciptakan elektron bebas, sehingga dapat bersifat seperti konduktor. Secara alami, kelimpahan Silikon di bumi mencapai 28% (Tewksbury, 2005). Oleh karena itu bahan ini banyak digunakan di berbagai bidang, khususnya elektronika. Salah satu aplikasinya adalah pemanfaatan Silikon sebagai komponen dioda.

Dioda merupakan sebuah divais elektronik yang terbentuk atas persambungan antara semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Kedua bahan ini dihasilkan dari penambahan atom impuritas pada semikonduktor intrinsik. Pada dasarnya, penambahan impuritas bertujuan untuk mengubah sifat dari suatu bahan (Subekti, 2003). Pada temperatur ruang, elemen impuritas terionisasi akan mengalami interaksi *Coulomb* dengan pembawa muatan setempat. Interaksi atom-atom terionisasi inilah yang menyebabkan adanya hamburan pada divais semikonduktor. Hamburan ini disebut hamburan impuritas terionisasi. Hamburan akibat proses tumbukan dari atom-atom terionisasi menyebabkan terjadinya perubahan kecepatan pada pembawa muatan (Gareso, 2012).

Fenomena ketergantungan pembawa muatan dalam bahan semikonduktor pada perubahan temperatur telah banyak dikaji secara eksperimental maupun simulasi. Pada tahun 2001, Cardona telah mengamati adanya perubahan pada mobilitas pembawa muatan ( $\mu$ ) akibat peningkatan hamburan impuritas terionisasi di bawah variasi temperatur operasional. Adanya perubahan mobilitas pembawa muatan dari bahan dan perubahan temperatur operasional akan mempengaruhi konsentrasi

pembawa muatan ( $n_i$ ) (Sze, 1981). Pada tahun 2013, Kurniawan melakukan analisis perubahan konsentrasi pembawa muatan ( $n_i$ ) akibat variasi temperatur operasional, dimana mobilitas muatan yang ada pada suatu bahan semikonduktor tersebut dianggap konstan.

Penambahan impuritas pada semikonduktor intrinsik dapat mengubah distribusi pembawa muatan pada material. Perubahan ini akan menghasilkan arus yang mengalir di dalamnya. Arus tersebut merupakan kontribusi dari pembawa muatan mayoritas dan pembawa muatan minoritas. Pembawa muatan mayoritas merupakan fungsi dari tegangan masukan (Aslizar, 1996). Di bawah variasi tegangan input, total arus yang dihasilkan dapat memberikan informasi tentang karakteristik kelistrikan dari bahan, yang ditunjukkan dalam bentuk kurva arus-tegangan. Kurva ini akan mengalami perubahan ketika terjadi perubahan temperatur operasional pada bahan (Boylestad dan Nashelsky, 2009).

Jumlah pembawa muatan yang terionisasi juga dipengaruhi oleh besarnya konsentrasi impuritas yang ditambahkan. Jumlah atom yang terionisasi sebanding dengan jumlah impuritas yang ditambahkan, sehingga tumbukan antar atom yang disebabkan karena atom yang terionisasi juga akan berubah. Semakin banyak tumbukan yang terjadi pada suatu bahan maka mobilitas muatan akan berkurang (Gareso, 2012). Adanya impuritas yang berada dalam keadaan terionisasi karena perubahan temperatur tentunya akan memberikan perubahan pula pada distribusi pembawa muatan yang dihasilkan. Dengan adanya penambahan konsentrasi pembawa muatan ini, memberikan pengaruh terhadap transport pembawa muatan yang dihasilkan. Perubahan mobilitas pembawa muatan akan menyebabkan perubahan pada difusivitas bahan (Gareso, 2012). Dengan demikian, jumlah arus difusi yang dihasilkan juga mengalami perubahan, sehingga turut mempengaruhi karakteristik kelistrikan bahan. Oleh karenanya, untuk mendapatkan informasi tentang hubungan karakteristik kelistrikan terhadap mobilitas dari pembawa muatan,

perlu dilakukan analisis pengaruh hamburan impuritas terionisasi akibat perubahan temperatur operasional pada bahan.

Di dalam Penelitian ini dilakukan simulasi efek hamburan impuritas terionisasi dengan variasi temperatur operasional. Temperatur operasional mempengaruhi nilai distribusi pembawa muatan pada dioda Silikon. Selain temperatur, variabel lain yang berpengaruh terhadap nilai konsentrasi pembawa muatan yaitu mobilitas pembawa muatan. Mobilitas muatan berbanding terbalik dengan temperatur operasional. Hasil simulasi distribusi pembawa muatan akibat variasi temperatur operasional dan mobilitas pembawa muatan akan dibandingkan dengan data kontrol. Data kontrol ini merupakan penelitian Kurniawan (2013). Kurniawan telah melakukan simulasi tentang distribusi pembawa muatan dioda Silikon dengan variasi temperatur operasional dimana mobilitas muatan dianggap konstan. Penambahan temperatur ini mempengaruhi nilai energi dan distribusi pembawa muatan yang ada pada dioda Silikon. Selain temperatur, mobilitas muatan pada bahan semikonduktor memberikan kontribusi terhadap jumlah pembawa muatan. Oleh karena itu, mobilitas muatan perlu diperhitungkan ketika menentukan nilai distribusi pembawa muatan yang ada pada dioda Silikon.

Untuk mengetahui nilai distribusi pembawa muatan pada dioda Silikon digunakan metode elemen hingga. Metode elemen hingga merupakan metode yang dapat menyelesaikan persamaan semikonduktor termodifikasi dengan memodelkan dioda Silikon dengan geometri tertentu dan membaginya menjadi elemen-elemen kecil. Solusi umumnya adalah penjumlahan dari masing-masing elemen.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, rumusan masalah yang akan dibahas adalah bagaimana hasil simulasi dari efek hamburan impuritas terionisasi terhadap distribusi pembawa muatan dioda Silikon yang dilakukan pada variasi temperatur operasional, menggunakan metode elemen hingga?

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Jenis bahan dioda yang dimodelkan adalah kristal Silikon (Si).
2. Dioda dimodelkan berbentuk penampang 2 dimensi.
3. Metode yang digunakan adalah metode elemen hingga (*Finite Element Method*).
4. Konsentrasi atom impuritas  $10^{14} \text{cm}^{-1}$ .

### 1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan hasil simulasi dari efek hamburan impuritas terionisasi terhadap distribusi pembawa muatan dioda Silikon yang dilakukan pada variasi temperatur operasional, menggunakan metode elemen hingga.

### 1.5 Manfaat

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur dan mobilitas muatan terhadap konsentrasi pembawa muatan. Beberapa manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah:

1. Memberikan sumbangan di bidang ilmu fisika bahan semikonduktor khususnya di bidang pemodelan komputasi;
2. Memberikan informasi fisis yang berkaitan dengan karakteristik dioda.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Material Semikonduktor

Menurut Goetzberger *et al.*, (1998), suatu material dapat dikelompokkan menjadi beberapa bagian berdasarkan sifat kelistrikannya yaitu:

1. Material konduktor yang memiliki nilai konduktivitas listrik lebih besar dari  $10^4 \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$
2. Material semikonduktor yang memiliki nilai konduktivitas listrik ( $10^4 - 10^{-8}$ )  $\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$
3. Material isolator yang memiliki nilai konduktivitas listrik lebih kecil dari  $10^{-8} \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$

Ketiga jenis material tersebut dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan komponen elektronika, contohnya material isolator banyak digunakan sebagai lapisan aktif pada komponen-komponen elektronika maupun komponen optoelektronika sedangkan material konduktor sering digunakan untuk pembuatan kontak pada komponen elektronika. Material semikonduktor digunakan sebagai bahan pembuatan dioda (Setiawan, 2007).

Semikonduktor merupakan bahan dengan konduktivitas listrik yang berada diantara isolator dan konduktor. Sebuah semikonduktor akan bersifat sebagai isolator pada temperatur yang sangat rendah, namun pada temperatur ruang akan bersifat sebagai konduktor. Semikonduktor sangat berguna dalam bidang elektronik. Hal ini dikarenakan konduktivitasnya dapat diubah-ubah dengan menyuntikkan material lain (*doping*) (Gareso, 2012). Bahan semikonduktor yang banyak dikenal contohnya adalah Silikon (Si), Germanium (Ge) dan Gallium Arsenida (GaAs). Germanium dahulu merupakan bahan satu-satunya yang dikenal untuk membuat komponen semikonduktor. Namun belakangan, Silikon menjadi populer setelah ditemukan cara

mengekstrak bahan ini di alam, Silikon merupakan bahan terbanyak kedua di bumi setelah oksigen ( $O_2$ ) (Parno, 2002).

Selain Silikon material lain yang banyak dipelajari dan diteliti adalah material paduan yang berasal dari golongan II-VI atau III-V dalam tabel periodik baik *binary* (paduan dua unsur) maupun *ternary* (paduan 3 unsur) (Setiawan *et al.*, 2007). Contoh material paduan 2 unsur adalah ZnO, GaN, InN, GaDb, sedangkan material paduan 3 unsur adalah AlGaIn, AlGaSb dan AlNAs. Material paduan tersebut memiliki ciri khas dan keunikan tersendiri baik ditinjau dari sifat listrik maupun sifat optiknya.

Tabel 2.1 Bahan semikonduktor dan nilai celah energinya

Bahan	Celah Energi(eV)	Bahan	Celah Energi
Golongan IV		Golongan III-V	
Si	1.11	Ga As	1.40
Ge	0.067	GaP	2.24
Sn	0.08	Ga Sb	0.77
		InAs	0.33
		InP	1.29
		InSb	1.66
Golongan II-IV		Golongan IV-VI	
CdS	2.40	PbS	0.40
ZnTe	2.66		
ZnS	-		
CdSe	-		

Sumber : Gareso (2012).

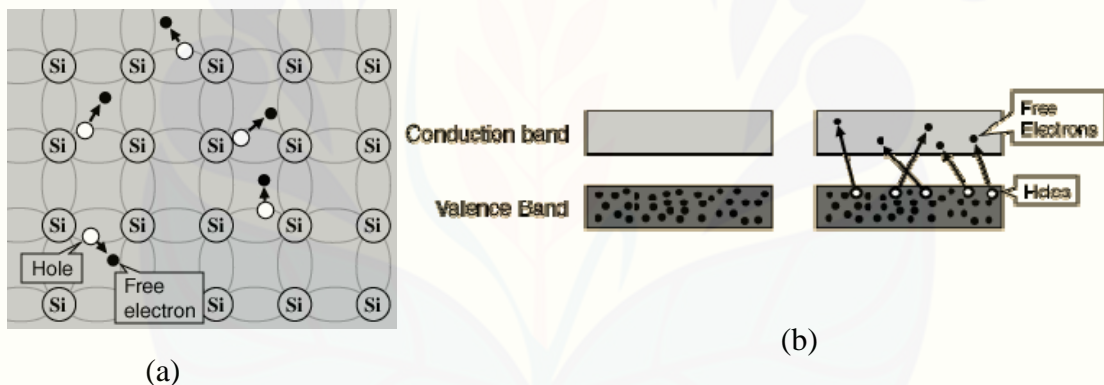
## 2.2 Klasifikasi semikonduktor

Ditinjau dari jenis pembawa muatan yang menghantarkan listrik dalam suatu bahan, bahan semikonduktor dibedakan menjadi bahan semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik.

### 2.2.1 Semikonduktor Intrinsik

Semikonduktor intrinsik merupakan bahan semikonduktor yang belum mengalami penyisipan atau impuritas oleh atom unsur lain. Jenis semikonduktor intrinsik memiliki jumlah pembawa elektron yang sama banyak dengan jumlah pembawa *hole*. Bahan semikonduktor intrinsik memiliki nilai konduktivitas yang relatif kecil sehingga mobilitas pembawa muatan menjadi kecil (Gareso, 2012).

Semikonduktor intrinsik merupakan semikonduktor yang terdiri atas satu unsur, misalnya Silikon (Si) atau Germanium (Ge) saja. Pada semikonduktor Silikon (Si), satu atom memiliki 4 elektron valensi yang berikatan dengan 4 atom Silikon (Si) lainnya. Ikatan yang terjadi antar atom Si yang berdekatan adalah ikatan kovalen. Hal ini disebabkan karena adanya pemakaian elektron secara bersama-sama oleh dua atom yang berdekatan (Parno *et al.*, 2002).



Gambar 2.1 Semikonduktor intrinsik (a) Struktur Kristal Si 2D (b) terbentuknya *hole* pada pita valensi (sumber: Parno, 2002)

Menurut teori pita energi, pada  $T=0$  K pita valensi semikonduktor terisi penuh oleh elektron, sedangkan pita konduksi kosong. Kedua pita tersebut dipisahkan oleh celah energi kecil dengan rentang (0.18 – 3.7) eV. Pada suhu kamar Si dan Ge masing-masing memiliki celah energi 1.11 eV dan 0.66 eV. Pada suhu yang lebih tinggi, misalnya pada suhu ruang (300K), sebagian elektron di pita valensi memiliki energi yang cukup untuk bertransisi ke pita konduksi. Hasilnya, terdapat elektron pada pita konduksi dan tercipta lubang (*hole*) pada pita valensi. *Hole* ini terbentuk

karena kekosongan (muatan) sebagai akibat transisi elektron antar pita, dari valensi ke konduksi. Baik elektron pada pita konduksi maupun *hole* pada pita valensi dapat bergerak bila pada semikonduktor tersebut diberi medan listrik (Setiawan *et al.*, 2007). Proses terbentuknya *hole* pada semikonduktor intrinsik ditunjukkan oleh Gambar 2.1.

Menurut Puri dan Babbar (2001) konsentrasi elektron dan *hole* sama besar. Nilai konsentrasi *hole* atau elektron dapat ditentukan dengan perumusan

$$dn = D(E)f(E)dE, \quad (2.1)$$

dimana  $D(E)$  adalah rapat keadaan elektron yang dapat dirumuskan dengan

$$D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m^*)^{\frac{2}{3}} E^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

sedangkan  $f(E)$  merupakan fungsi distribusi Fermi. Distribusi Fermi dapat ditentukan dengan persamaan

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_f}{k_B T}\right) + 1} \quad (2.3)$$

dengan  $E_f$  adalah energy Fermi dan  $k_B$  adalah konstanta Boltzman  $8.614 \times 10^5 \text{ eVK}^{-1}$ . Persamaan (2.2) dan (2.3) disubstitusikan ke persamaan (2.1) akan diperoleh persamaan untuk mendapatkan konsentrasi elektron ( $n_n$ ) dan konsentrasi *hole* ( $n_p$ ) sebagai berikut:

$$n_n = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[ - \left( \frac{E_c - E_f}{k_B T} \right) \right] \quad (2.4)$$

$$n_p = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[ - \left( \frac{E_f - E_v}{k_B T} \right) \right] \quad (2.5)$$

dimana  $m_n^*$  = massa efektif elektron (kg)

$m_p^*$  = massa efektif *hole* (kg)

$E_c$  = tingkat energi dasar pita konduktif (eV)

$E_v$  = tingkat energi puncak pita valensi (eV)

$E_f$  = tingkat energi Fermi dalam struktur pita energy (eV)



$h =$  konstanta planck ( $6,62 \times 10^{-34}$ )

Dari beberapa persamaan (2.4) dan (2.5), akan diperoleh konsentrasi pembawa muatan intrinsik  $n_i$ . Persamaan tersebut diawali dengan persamaan berikut

$$n_n \cdot n_p = n_i^2 \quad (2.6)$$

sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut

$$n_i^2 = 4 \left( \frac{2\pi k_B T}{h^2} \right)^3 (m_p^* m_n^*)^{\frac{3}{2}} \exp \left( -\frac{E_g}{k_B T} \right) \quad (2.7)$$

akhirnya persamaan konsentrasi pembawa muatan intrinsik adalah

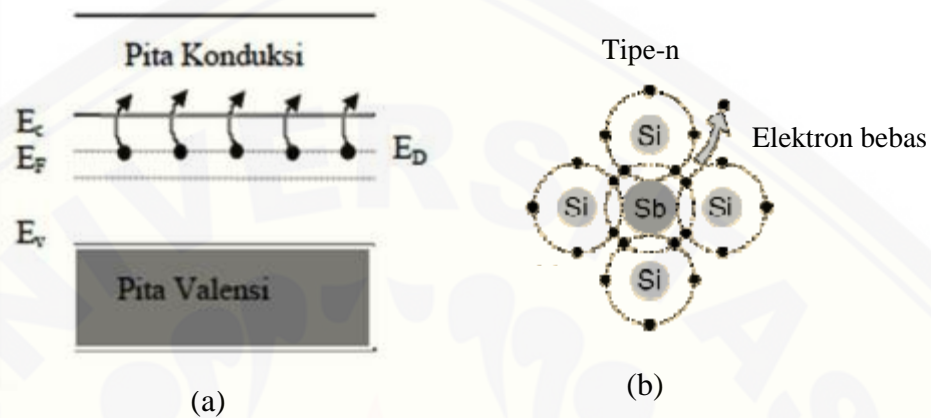
$$n_i = 2 \left( \frac{2\pi k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_p^* m_n^*)^{\frac{3}{4}} \exp \left( -\frac{E_g}{2k_B T} \right) \quad (2.8)$$

### 2.2.2 Semikonduktor Ekstrinsik

Semikonduktor ekstrinsik adalah semikonduktor yang sudah disisipi atom yang lain. Atom impuritas yang ditambahkan menyebabkan jenis pembawa muatan dalam bahan semikonduktor hanya salah satu saja yang dominan, yaitu elektron atau *hole*. Berdasarkan jenis impuritas yang diberikan bahan semikonduktor dapat dibedakan menjadi semikonduktor tipe-n dan semikonduktor tipe-p.

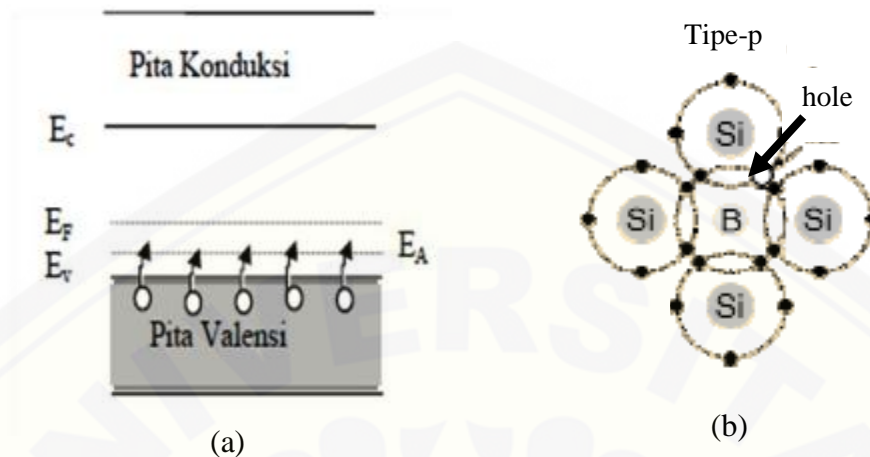
Semikonduktor ekstrinsik dengan pembawa muatan mayoritas elektron disebut semikonduktor tipe-n. Semikonduktor ini dapat dibuat dengan menambahkan atom impuritas yang bervalensi lima (*pentavalent*) pada semikonduktor murni yang bervalensi empat (*tetravalent*). Contoh atom pentavalent adalah Arsen (As), Antimony (Sb) dan Fosfor (P). Gambar 2.2 menunjukkan kristal Silikon (Si) yang diberi pengotor *pentavalent* berupa atom Antimoni (Sb). Atom Sb menjadi atom pusat memiliki lima elektron valensi, ketika atom Sb didopingkan ke atom Si yang bervalensi empat maka antara atom Si dengan atom Sb terbentuk empat ikatan kovalen sehingga atom Sb mempunyai kelebihan elektron. Elektron sisa ini kemudian menjadi elektron bebas yang bebas bergerak pada orbit pita konduksi karena tidak

terikat pada orbit valensi. Pengotor pada semikonduktor tipe-n disebut atom donor karena menghasilkan elektron bebas (Malvino, 1979).



Gambar 2.2 Semikonduktor ekstrinsik tipe-n (a) Energy gap atom Silikon (b) Kristal Silikon dengan atom pengotor Antimoni (sumber: Kittel, 1976)

Semikonduktor yang memiliki pembawa muatan mayoritas *hole* disebut semikonduktor tipe-p. Semikonduktor tipe-p dibuat dengan menambahkan pengotor berupa atom bervalensi tiga pada atom intrinsik. Gambar 2.3 merupakan contoh dari semikonduktor tipe-p yang berupa atom Silikon (Si) diberi pengotor atom Boron (B). Atom Boron memiliki tiga elektron valensi sehingga membentuk tiga ikatan kovalen dengan atom Si yang bervalensi empat. Seharusnya atom Silikon dapat membentuk empat ikatan kovalen dengan atom lainnya, namun pada kasus ini ikatan kovalen keempat tidak dapat terbentuk karena kekurangan satu elektron, akibatnya terbentuklah *hole*. Pengotor pada semikonduktor tipe-p disebut atom akseptor (Fukuda, 1999).



Gambar 2.3 Semikonduktor ekstrinsik tipe-p (a) Energi gap (b) Kristal Silikon dengan atom pengotor Boron (Sumber: Kittel, 1976)

### 2.3 Hamburan Impuritas Terionisasi

Penambahan atom impuritas pada bahan semikonduktor bertujuan untuk mengontrol karakteristik bahan tersebut. Pada temperatur ruang atom pengotor akan terionisasi sehingga dan terjadi interaksi *Coulomb* dengan pembawa muatan (elektron atau *hole*). Interaksi *Coulomb* ini akan menghasilkan hamburan atau tumbukan sehingga akan mengubah karakteristik kecepatan pembawa muatan. Ketika suatu bahan semikonduktor dikenai temperatur maka kecepatan termal pembawa muatan akan berubah. Kecepatan termal pembawa muatan akan meningkat jika temperatur dinaikkan (Gareso, 2012). Banyaknya hamburan yang disebabkan oleh adanya gaya elektrostatis antara pembawa muatan dan impuritas yang terionisasi bergantung pada waktu interaksi dan banyaknya impuritas (Rusdiana, 2010).

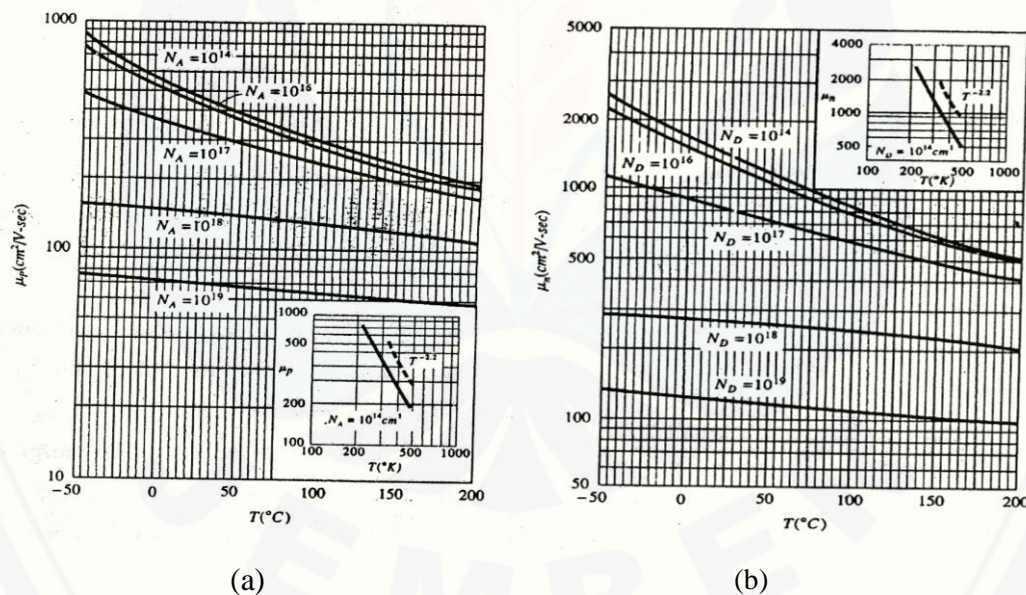
Interaksi antara atom impuritas dengan pembawa muatan menghasilkan hamburan dan mempengaruhi kecepatan pembawa muatan.

$$\mu = \frac{T^{3/2}}{N_i} \quad (2.9)$$

$N_i$  merupakan konsentrasi total impuritas yang terionisasi. Jika terjadi kenaikan temperatur, kecepatan termal pembawa muatan yang terjadi di sekitar impuritas

terionisasi juga meningkat. Berkurangnya waktu yang digunakan akan mengakibatkan naiknya mobilitas muatan ( $\mu$ ). Jika jumlah impuritas yang terionisasi meningkat maka probabilitas terjadinya hamburan juga akan meningkat sehingga akan menurunkan harga mobilitas muatan ( $\mu$ ) (Subekti, 2003).

Besarnya konsentrasi dopan mempengaruhi jumlah pembawa muatan yang terionisasi. Semakin besar konsentrasi dopan yang ditambahkan pada suatu bahan semikonduktor maka jumlah muatan yang terionisasi juga semakin besar. Hal ini menyebabkan tumbukan antara pembawa muatan semakin besar. Kecepatan pembawa muatan menjadi lebih kecil yang diakibatkan oleh banyaknya tumbukan yang terjadi. Hal ini yang menyebabkan mobilitas pembawa muatan menjadi lebih kecil (Gareso, 2012). Hubungan antara temperatur dan mobilitas muatan (*electron* dan *hole*) dengan konsentrasi atom impuritas yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Grafik mobilitas muatan terhadap temperatur dengan konsentrasi impuritas yang berbeda (a) mobilitas hole (b) mobilitas elektron (Sumber: Sze, 1981)

Menurut Karthik *et al.*, (2011), mobilitas pembawa muatan akibat peristiwa hamburan impuritas terionisasi dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\mu = (e/m)\langle\tau_m\rangle \quad (2.10)$$

Jika waktu relaksasi  $\tau_m$  didefinisikan oleh

$$\tau_m = \varepsilon^{3/2} N_i^{-1} 16\pi\sqrt{2m}(\chi\chi_0/Ze^2)^2 [\ln(1 + \beta^2) - \beta^2/(1 + \beta^2)]^{-1} \quad (2.11)$$

dan rata-rata waktu relaksasi adalah

$$\langle\tau_m\rangle = \left(\frac{4}{3\sqrt{\pi}}\right) \int_0^\infty \tau_m \left(\frac{\varepsilon}{k_B T}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T}\right) d\varepsilon/k_B T \quad (2.12)$$

maka persamaan 2.10 menjadi

$$\mu = \frac{2^{7/2}(4\pi\chi\chi_0)^2(k_B T)^{3/2}}{\pi^{3/2}Z^2e^3m^{1/2}N_i[\ln(1 + \beta^2) - \beta^2/(1 + \beta^2)]} \quad (2.13)$$

dengan

$$\beta = 2\frac{m}{\hbar}\left(\frac{2}{m}3k_B T\right)^{1/2} L_D \quad (2.14)$$

dimana  $\tau_m$  = waktu relaksasi (s)

$\chi$  = konstanta dielektrik relatif

$\chi_0$  = permitivitas pada ruang bebas

$Ze$  = muatan atom

$L_D$  = panjang Debye

$\varepsilon$  = permitivitas bahan

$\hbar$  = konstanta planck bar ( $1,05 \times 10^{-34}$ )

(Seegar, 1989).

Mobilitas listrik pembawa muatan pada penggunaan medan listrik rendah secara langsung berhubungan dengan sifat-sifat mikroskopik bahan. Dengan adanya waktu relaksasi ( $\tau_m$ ) yang merupakan suatu fungsi dimana distribusi elektron berelaksasi kembali ke keadaan mantap setelah mengalami hamburan oleh suatu potensial penghambur. Suatu pembawa muatan dapat dihamburkan oleh suatu potensial penghambur yang dapat mengubah perioditas sempurna dari kristal ideal. Mekanisme hamburan antara satu material dengan lainnya berbeda serta merupakan fungsi dari temperatur (Rusdiana, 2010).

## 2.4 Persamaan Dasar Divais Semikonduktor

### 2.4.1 Persamaan Rapat Arus

Suatu medan listrik dikenakan pada suatu semikonduktor maka akan menghasilkan gaya pada elektron dan *hole* sehingga pembawa muatan akan mengalami pergerakan dan percepatan (Subekti, 2003). Elektron dan *hole* pada semikonduktor berpengaruh pada karakteristik suatu bahan listrik pada persambungan semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n (sambungan p-n). Pada sambungan p-n ada dua jenis arus yang mengalir di dalamnya, yaitu arus *drift* dan arus *difusi* (Colinge, 2002). Arus *drift* adalah aliran muatan akibat adanya medan listrik. Rata-rata kecepatan *drift* pembawa muatan akibat medan listrik dinyatakan dengan suatu parameter mobilitas. Gerakan elektron dan *hole* dalam semikonduktor dipengaruhi oleh adanya tumbukan antara atom penyusun semikonduktor dengan atom impuritas yang terionisasi. Sedangkan arus *difusi* adalah proses aliran muatan partikel dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah. Jika partikel tersebut bermuatan, maka difusi partikel akan memberikan arus *difusi*. Rapat arus *difusi* ditentukan oleh besarnya gradien konsentrasi pembawa muatan (Subekti, 2003).

Ketika partikel bermuatan dalam semikonduktor bergerak akibat adanya medan listrik, maka laju pergerakannya berbanding lurus dengan medan listriknya.

$$v_n = \mu_n E \quad (2.15)$$

$$v_p = \mu_p E \quad (2.16)$$

dimana  $v_n$  = laju *drift* elektron (m/s)

$v_p$  = laju *drift hole* (m/s)

$\mu_n$  = mobilitas elektron ( $\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )

$\mu_p$  = mobilitas *hole* ( $\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )

Persamaan untuk menentukan rapat arus *drift* elektron dan *hole* sebagai berikut:

$$j_p = qp\mu_p E \quad (2.17)$$

$$j_n = qn\mu_n E \quad (2.18)$$

Dari persamaan di atas, rapat arus total *drift* pada persambungan p-n adalah:

$$j_T = j_p + j_n = qE(p\mu_p + n\mu_n) \quad (2.19)$$

Ketika terjadi perbedaan konsentrasi pembawa muatan, maka arus *difusi* akan sebanding dengan gradien konsentrasi.

$$j_p^{diff} = -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.20)$$

$$j_n^{diff} = +qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.21)$$

dimana  $j_p^{diff}$  =rapat arus *difusi hole* (A/cm)

$j_n^{diff}$  =rapat arus *difusi elektron* (A/cm)

$D_p$  =konstanta difusivitas *hole*

$D_n$  = konstanta difusivitas elektron

Arus total yang terjadi pada sambungan p-n adalah gabungan dari arus *drift* dan arus *difusi*. Sehingga arus total dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$j_p^T = qn\mu_p E - qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.22)$$

$$j_n^T = qn\mu_n E + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.23)$$

dengan  $j_p^T$  adalah arus total *hole* ( $\text{Acm}^{-1}$ ) dan  $j_n^T$  adalah arus total elektron ( $\text{Acm}^{-1}$ )

#### 2.4.2 Persamaan Poisson

Menurut Goetzberger *et al.*, (1998), persamaan Poisson adalah persamaan divergensi medan listrik (E). Perubahan medan listrik terhadap posisi sebanding dengan nilai rapat muatan ( $\rho$ ). Jika dihubungkan dengan permitivitas bahan, semakin kecil nilai permitivitas bahan maka semakin besar medan listrik yang dihasilkan. Secara matematis, persamaan Poisson dapat ditulis sebagai berikut :

$$\nabla \cdot E = -\nabla^2 \psi = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.24)$$

dimana  $\psi$  =potensial elektrostatis

$\epsilon$  =permitivitas bahan

Jika pembawa muatan terdiri atas beberapa komponen seperti yang dijelaskan pada persamaan (2.25)

$$\rho = q(p - n + N_D^+ + N_A^-) \quad (2.25)$$

maka persamaan Poisson menjadi

$$\nabla \cdot E = -\nabla^2 \psi = \frac{q(p - n + N_D^+ + N_A^-)}{\epsilon} \quad (2.26)$$

Rapat muatan ( $\rho$ ) merupakan penjumlahan pembawa muatan negatif ( $n$ ) dan pembawa muatan positif ( $p$ ). Sedangkan  $N_D^+$  dan  $N_A^-$  merupakan konsentrasi donor dan aseptor yang terionisasi. Adapun nilai permitivitas bahan  $\epsilon$  bergantung pada konstanta dielektrik suatu bahan (Colinge *et al.*, 2002).

Persamaan Poisson akan berubah menjadi persamaan (2.27) jika jumlah muatan  $p$  dan  $n$  diganti dengan persamaan tingkat quasi-fermi.

$$\nabla \cdot E = -\nabla^2 \psi = \frac{q}{\epsilon} (e^{\psi} u - e^{-\psi} v - N_D^+ + N_A^-) \quad (2.27)$$

yang mana persamaan tingkat quasi-fermi sebagai berikut:

$$n = e^{\psi} u \quad (2.28)$$

dan

$$p = e^{-\psi} v \quad (2.29)$$

dimana  $u$  merupakan variabel bebas untuk elektron dan  $v$  merupakan variable bebas untuk *hole*.

#### 2.4.3 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan

Menurut Danielsson (2000), persamaan kontinuitas pada material semikonduktor dikenal dengan istilah proses generasi dan rekombinasi. Proses generasi adalah terjadinya pasangan elektron dan *hole* per detik per meter kubik, sedangkan proses rekombinasi adalah proses bergabungnya pasangan elektron dan *hole* per detik per meter kubik. Dari proses rekombinasi (R) dan generasi (G) dapat dihitung nilai rapat arus dari pembawa muatan. Persamaan kontinuitas pembawa muatan dalam keadaan *steady* untuk rapat arus elektron dan *hole* adalah:



$$-\frac{1}{q}\nabla j_n = G - R \quad (2.30)$$

$$\frac{1}{q}\nabla j_p = G - R \quad (2.31)$$

Pada mekanisme rekombinasi (R) dikenal sebagai rekombinasi nonradiatif yang terjadi akibat proses ketidakmurnian. Mekanisme ini dikenal dengan rekombinasi *Shockly-Ready-Hall* ( $R_{SRH}$ ). Rekombinasi *Shockly-Ready-Hall* merupakan rekombinasi elektron dan *hole* dengan menggunakan perangkat berupa tingkat ketidakmurnian pada celah pita energi semikonduktor (Danielsson, 2000). Rekombinasi *Shockly-Ready-Hall* dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.32)$$

dengan  $n_i$  = konsentrasi pembawa muatan intrinsik ( $m^{-2}$ )

$\tau_p$  = *lifetime* pembawa muatan positif (s)

$\tau_n$  = *lifetime* pembawa muatan negative (s)

$n_1$  = parameter konsentrasi elektron

$p_1$  = parameter konsentrasi *hole*

Apabila perangkat tingkat ketidakmurnian terdapat di antara celah pita terlarang maka  $n_1$  dan  $p_1$  sama dengan  $n_i$ . Dengan demikian rapat arus elektron maupun *hole* untuk divais semikonduktor persambungan p-n dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$\nabla j_n = -qG + qR_{SRH} \quad (2.33)$$

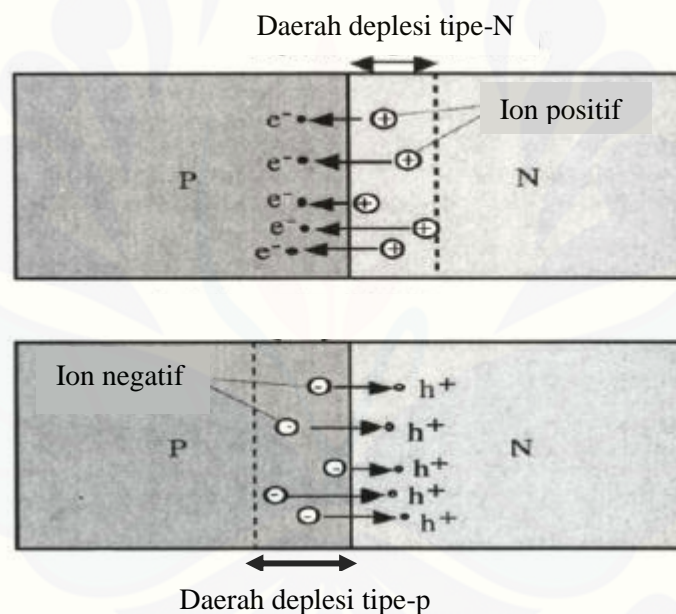
$$\nabla j_p = qG - qR_{SRH} \quad (2.34)$$

## 2.5 Dioda

Dioda terbuat dari bahan semikonduktor intrinsik yang diberi atom impuritas (*dopping*). Setelah diberi atom tambahan, bahan tersebut berubah menjadi semikonduktor tipe-n ataupun semikonduktor tipe-p. Dioda terbentuk dari sambungan bahan semikonduktor tipe p dan bahan semikonduktor tipe-n. Metode yang dapat

digunakan untuk membuat persambungan p-n diantaranya metode paduan, difusi dan epitaksi (Rio, 1999).

Perbedaan konsentrasi elektron pada semikonduktor tipe-p dan tipe-n menyebabkan terjadinya difusi elektron dari tipe-n ke tipe-p. Elektron tersebut mengalami rekombinasi dengan *hole* yang ada pada semikonduktor tipe-p. Konsentrasi *hole* pada tipe-p lebih besar dari pada tipe-n, sehingga *hole* mengalami *difusi* dari tipe-p ke tipe-n. *Hole* hasil *difusi* berekombinasi dengan elektron pada daerah tipe-n. Proses rekombinasi ini menyebabkan terjadinya pasangan elektron *hole* pada daerah tipe-p dan daerah tipe-n sehingga daerah ini bersifat netral (Sutrisno, 1986). Proses rekombinasi ditunjukkan oleh gambar 2.5.



Gambar 2.5 Difusi elektron dan *hole* (sumber: Colinge *et al.*, 2002)

Menurut Subekti (2003), proses *difusi* pembawa muatan (*electron* dan *hole*) mayoritas menyebabkan terbentuknya daerah deplesi di sekitar daerah persambungan. Pada kedua ujung daerah deplesi terjadi penumpukkan *hole* dan *electron* sehingga muncul beda potensial penghalang ( $\psi$ ). Medan listrik yang ditimbulkan oleh beda potensial penghalang menyebabkan elektron berpindah dari tipe-n ke tipe-p. Perpindahan muatan memerlukan energi sebesar  $q\psi$  dimana  $q$  adalah muatan

elektron dengan nilai  $1,602 \times 10^{-19}C$ . Proses difusi tidak berlangsung terus menerus. Hal ini dikarenakan elektron yang sudah berada di posisinya akan menolak elektron lain yang datang. Proses difusi akan berakhir ketika elektron tidak memiliki energi yang cukup untuk berpindah.

Pada daerah deplesi terjadi penumpukan muatan pada masing-masing sisi persambungan, sedangkan pada daerah ujung lainnya bersifat netral. Potensial penghalang ( $V_0$ ) akan menahan terjadinya difusi pembawa muatan mayoritas dan terjadi arus drift pada daerah persambungan. Pada temperatur ruang, besarnya Potensial penghalang untuk Silikon adalah 0,7 Volt.

## 2.6 Metode Elemen Hingga

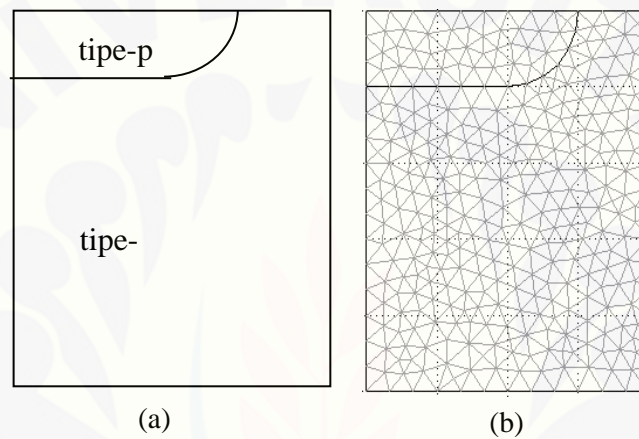
Pada umumnya, simulasi divais elektronika termasuk dioda memerlukan solusi numerik dari sejumlah persamaan matematis yang menghubungkan sifat material dan mekanisme operasional divais tersebut. Untuk mempermudah perhitungan, dalam penyelesaian beberapa persamaan matematis digunakan perangkat lunak, seperti AMPS Simulator, ASDMP, ASA dan FEMLAB (Usman, 2006).

Salah satu metode numerik yang penggunaannya lebih fleksibel adalah metode elemen hingga. Metode elemen hingga dapat digunakan untuk melakukan modifikasi sesuai dengan struktur geometri yang disimulasikan. Metode elemen hingga dapat digunakan untuk simulasi 1D, 2D ataupun 3D pada divais dengan struktur geometri yang rumit (Usman, 2006). Awalnya, metode elemen hingga hanya digunakan untuk menyelesaikan persoalan fisika yang tidak dapat diselesaikan secara analitik. Penggunaan metode elemen hingga semakin berkembang. Beberapa penelitian yang menggunakan metode elemen hingga diantaranya penumbuhan lapisan tipis silikon amorf terhidrogenasi dengan teknik HWC-VHF-PECVD dan aplikasinya pada divais sel surya pada tahun 2006 oleh Usman.

Metode elemen hingga merupakan suatu metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial dan beberapa kondisi batas. Metode

elemen hingga adalah metode membagi suatu domain menjadi bagian yang lebih kecil atau biasa disebut subdomain (Polycarpou, 2006). Semakin kecil elemen yang didefinisikan, hasil yang diperoleh semakin akurat. Metode elemen hingga dapat mengubah suatu fungsi kontinu menjadi fungsi diskrit, sehingga solusi umum dari suatu persamaan yang diselesaikan tersebut berupa penjumlahan masing-masing elemen.

Geometri dioda Silikon dan bentuk *mesh* ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Geometri dioda silikon 2D (a) Geometri dioda Silikon dalam 2D (b) Pendefinisian Geometri dioda Silikon 2D menjadi elemen lebih kecil (Sumber: Daniellson, 2000)

Distribusi pembawa muatan pada divais semikonduktor tidak berbentuk linier sehingga digunakan elemen hingga untuk melakukan simulasi. Metode elemen hingga merupakan metode yang dapat mengubah daerah domain menjadi segitiga atau segiempat kecil (Handayanu, 2012).

Dalam simulasi dioda Silikon dengan metode elemen hingga digunakan variabel  $\psi$ ,  $n$  dan  $p$  yang masing-masing mendefinisikan potensial elektrostatik, konsentrasi elektron dan *hole*. Solusi umum untuk semua elemen ditentukan sebagai:

$$n = \sum_{j=1}^a n_j \quad (2.32)$$

$$p = \sum_{j=1}^a p_j \quad (2.33)$$

$$\psi = \sum_{j=1}^a \psi_j \quad (2.34)$$

dimana  $a$  merupakan jumlah elemen yang ada pada geometri (Usman, 2006).

Menurut Usman (2006), metode elemen hingga juga melakukan beberapa pendekatan, diantaranya dengan mendefinisikan fungsi bentuk ( $\xi$ ). Hal ini dikarenakan tiap elemen-elemen memiliki ukuran dan bentuk segitiga atau segiempat yang berbeda. Pendekatan fungsi bentuk dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$n_j = \sum_{k=1}^b n_k \xi_k(x, y) \quad (2.35)$$

$$p_j = \sum_{k=1}^b p_k \xi_k(x, y) \quad (2.36)$$

$$\psi_j = \sum_{k=1}^b \psi_k \xi_k(x, y) \quad (2.37)$$

dengan  $b$  merupakan derajat kebebasan dalam tiap elemen, sedangkan  $\xi_k(x, y)$  merupakan fungsi bentuk yang berada pada koordinat  $(x, y)$ . Fungsi bentuk akan bernilai nol ketika berada pada elemen batas. Dengan menggabungkan persamaan di atas maka diperoleh persamaan berikut:

$$n = \sum_{j=1}^a \left\{ \sum_{k=1}^b n_k \xi_k(x, y) \right\}_j \quad (2.38)$$

$$p = \sum_{j=1}^a \left\{ \sum_{k=1}^b p_k \xi_k(x, y) \right\}_j \quad (2.39)$$

$$\psi = \sum_{j=1}^a \left\{ \sum_{k=1}^b \psi_k \xi_k(x, y) \right\} \quad (2.40)$$

Pada metode elemen hingga, persamaan Poisson diasumsikan dalam domain  $\Omega$  yang bervolume  $V$ , sehingga persamaan (2.26) dapat ditulis dengan

$$\int_{\Omega} \xi_k (\nabla^2 \psi) dV + \int_{\Omega} \xi_k \frac{q}{\epsilon} (N_D - n + p - N_A) dV = 0 \quad (2.41)$$

Persamaan (2.41) dapat diselesaikan dengan mengaplikasikan persamaan identitas menjadi

$$\nabla \cdot (\xi_k (\nabla \psi)) = \nabla \xi_k \cdot \nabla \psi + \xi_k \nabla \cdot (\nabla \psi) \quad (2.42)$$

Jika persamaan Poisson mengalami transformasi integral volume ke dalam integral luas, maka persamaan Poisson menjadi

$$\int_{\Gamma} \xi_k \epsilon \cdot da = \int_{\Omega} (\epsilon \nabla \psi \cdot \nabla \xi_k - q \xi_k (N_D - n + p - N_A)) dV \quad (2.43)$$

dimana  $\hat{n}$  merupakan vektor satuan yang tegak lurus dengan batas  $\Gamma$  dari domain  $\Omega$ .

Perumusan yang sama juga berlaku pada persamaan kontinuitas pembawa muatan (elektron dan *hole*), sehingga dapat dituliskan

$$\int_{\Gamma} \xi_k J_n \cdot da = \int_{\Omega} \left( q \xi_k \frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \xi_k \cdot J_n - q \xi_k (G - R) \right) dV \quad (2.44)$$

$$\int_{\Gamma} \xi_k J_p \cdot da = \int_{\Omega} \left( q \xi_k \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \xi_k \cdot J_p + q \xi_k (G - R) \right) dV \quad (2.45)$$

(Usman, 2006)

## **BAB 3. METODE PENELITIAN**

### **3.1 Jenis Penelitian**

Penelitian yang dilakukan berupa kegiatan simulasi efek hamburan impuritas terionisasi terhadap distribusi pembawa muatan dioda Si pada variasi temperatur operasional dan variasi mobilitas muatan, dimana perubahan mobilitas muatan ini merupakan fungsi dari temperatur. Konsentrasi pembawa muatan tersebut diperoleh melalui pengolahan parameter fisis yang diketahui. Penelitian ini bersifat kuantitatif karena grafik hubungan antara konsentrasi pembawa muatan dioda Silikon terhadap temperatur diperoleh dari perhitungan secara numerik. Hasil yang diperoleh akan dibandingkan dengan data kontrol dimana mobilitas muatan dianggap konstan.

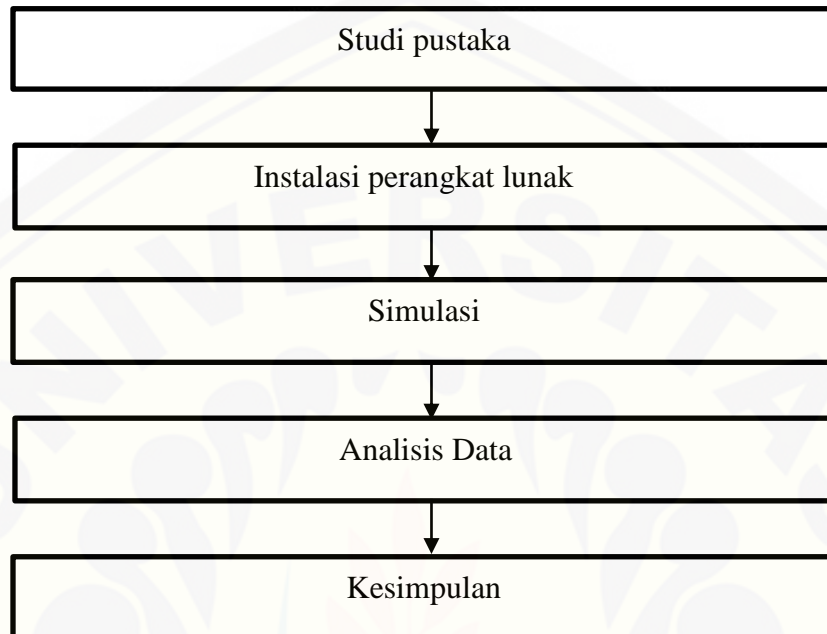
### **3.2 Tempat dan Waktu Penelitian**

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika Fakultas, Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Pelaksanaan kegiatan penelitian dimulai dari April 2015 sampai dengan Juni 2015.

### **3.3 Metode Penelitian**

Metode yang digunakan untuk menentukan besarnya konsentrasi pembawa muatan pada dioda Silikon adalah metode elemen hingga (*finite element method*). Penelitian akan diawali dengan studi pustaka dari berbagai sumber. Kegiatan dilanjutkan dengan melakukan penginstalan perangkat lunak pada PC dengan prosesor AMD C-60 APU with Radeon™ HD Graphics 1.00 GHz. Setelah perangkat lunak telah terinstal dan siap digunakan maka dilakukan kegiatan simulasi sehingga akan dihasilkan grafik pengaruh temperatur terhadap konsentrasi pembawa muatan. Hasil simulasi kemudian dianalisis dan menjadi dasar untuk membuat

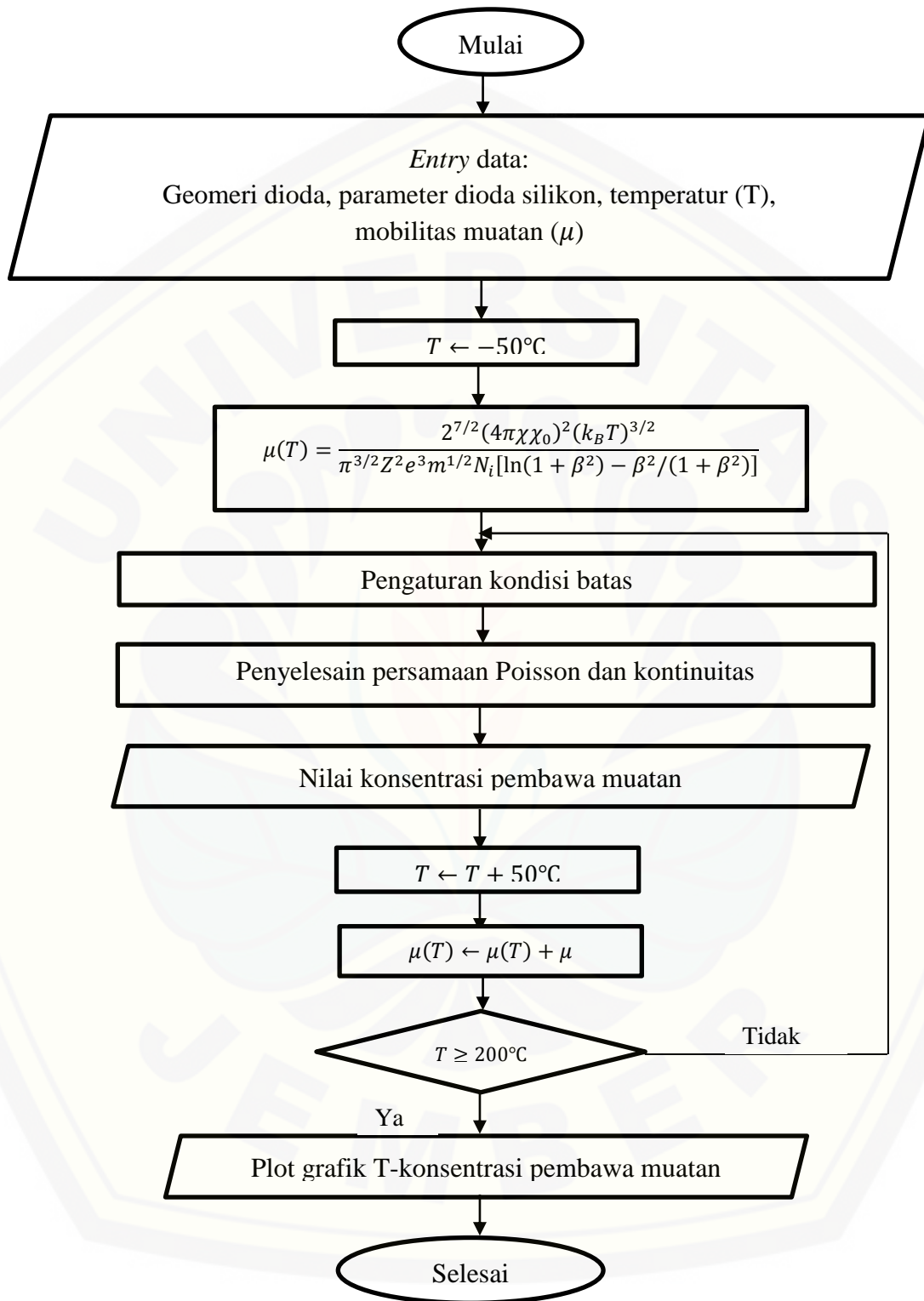
kesimpulan. Proses kegiatan penelitian yang telah diuraikan di atas ditampilkan dalam bentuk diagram alir yang dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Profil distribusi pembawa muatan yang diperoleh dari hasil penelitian merupakan solusi dari persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas yang merupakan persamaan dasar dari dioda Silikon. Kegiatan simulasi untuk mengetahui pengaruh temperatur operasional terhadap konsentrasi pembawa muatan dimulai dengan memasukkan data konstanta yang berupa geometri dioda, parameter dioda, variasi temperatur dan mobilitas muatan. Selanjutnya dilakukan pengaturan kondisi batas yang dilanjutkan dengan penyelesaian persamaan Poisson dan kontinuitas sehingga diperoleh grafik konsentrasi pembawa muatan. Hal yang dilakukan selanjutnya adalah memvariasi temperatur operasional dari  $-50^{\circ}\text{C}$  hingga  $200^{\circ}\text{C}$ . Selain itu mobilitas elektron divariasikan dari  $2800\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  hingga  $500\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Mobilitas *hole* divariasikan dari  $890\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  hingga  $195\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Proses ini akan menghasilkan grafik hubungan antara konsentrasi pembawa muatan terhadap temperatur untuk mobilitas muatan yang berbeda. Proses kegiatan simulasi dari awal sampai akhir dapat dilihat pada Gambar 3.2.

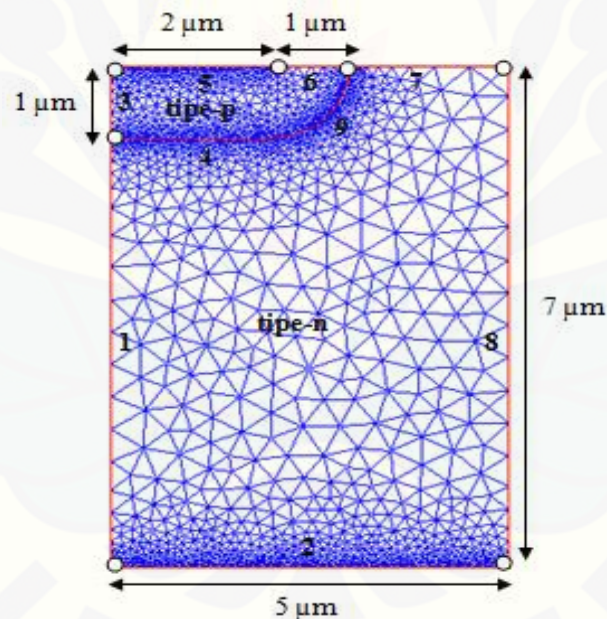




Gambar 3.2 Diagram alir simulasi

### 3.3.1 Geometri Dioda Silikon

Pemodelan geometri pembawa muatan dioda Silikon (Si) dengan variasi temperatur operasional diawali dengan perancangan model yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Geometri divais dioda Silikon dimodelkan dalam bentuk 2D. Dioda tersebut terdiri dari 2 daerah subdomain yaitu subdomain 1 berupa Silikon tipe-n dan subdomain 2 berupa Silikon tipe-p. Panjang struktur tipe-p pada simulasi adalah  $1\ \mu\text{m}$  dan panjang struktur tipe-n adalah  $7\ \mu\text{m}$ . Geometri dioda Silikon terdiri dari 9 batas. Batas 2 (katoda) dan 5 (anoda) merupakan batas kontak dioda dengan logam sedangkan batas 4 dan 9 merupakan daerah persambungan dioda Silikon tipe-p dan tipe-n. Dengan menggunakan metode elemen hingga, geometri dioda kemudian dibagi menjadi daerah yang lebih kecil (*mesh*).



Gambar 3.3 *mesh* dioda Silikon

### 3.3.2 Parameter Dioda Silikon

Kegiatan simulasi yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan parameter input berupa parameter karakteristik material Silikon. Beberapa parameter diambil dari beberapa referensi baik hasil dari eksperimen maupun simulasi. Parameter yang digunakan antara lain besar muatan elektron ( $q$ ) yang bernilai  $1,6 \times 10^{-19}$  C,

permitivitas dalam ruang hampa ( $\epsilon_0$ ) dengan nilai  $8,85 \times 10^{-12}$  F/m dan konstanta Boltzman ( $k_B$ )  $1,381 \times 10^{-23}$  J/K (Geotzberger, 1998). Parameter lain yang digunakan pada simulasi dioda Silikon adalah permitivitas bahan Silikon ( $\epsilon_r$ ) yang nilainya 11,8. Laju rekombinasi yang digunakan adalah parameter *lifetime* elektron ( $\tau_n$ ) dan *lifetime hole* ( $\tau_p$ ) serta temperatur (T) dengan besar  $-50^\circ\text{C}$  hingga  $200^\circ\text{C}$ . Nilai *lifetime* elektron ( $\tau_n$ ) dan nilai *lifetime hole* ( $\tau_p$ ) merupakan fungsi dari mobilitas muatan ( $\mu$ ). Parameter berupa mobilitas elektron divariasikan dari  $2800 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  hingga  $950 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Mobilitas *hole* divariasikan dari  $890 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  hingga  $195 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Pada simulasi yang akan dilakukan variasi temperatur operasional hanya berpengaruh pada mobilitas pembawa muatan dan jumlah muatan yang ada pada suatu bahan. Parameter input yang lain dianggap konstan. Sedangkan konsentrasi atom donor dan atom akseptor dianggap terionisasi seluruhnya. Pada data kontrol, parameter input yang digunakan sama dengan parameter di atas, hanya saja mobilitas pembawa muatan dianggap konstan. Nilai mobilitas elektron  $800 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  dan nilai mobilitas *hole*  $200 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

Tabel 3.1 Faktor skala untuk parameter input

Parameter	Faktor skala	Parameter ekuivalen
$x, y, \lambda$	$x_0 = 10^{-3} \text{ cm}$	$x_1 x_0, y_1 x_0, \lambda x_0$
$\psi, V$	$\psi = \frac{kT}{q}$	$\frac{\psi}{V_a}, \frac{\psi_0}{\psi_0}$
$n, p, N$	$C_0 = 1,001 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$\frac{n}{C_0}, \frac{p}{C_0}, \frac{N}{C_0}$
$D_n, D_p$	$\max\left(\frac{kT}{q} \mu_n, \frac{kT}{q} \mu_p\right)$	$\frac{D_n}{D_0}, \frac{D_p}{D_0}$

Sumber: Danielsson (2000).

Ada beberapa parameter yang digunakan dalam kegiatan simulasi dalam bentuk tanpa satuan. Oleh karena itu digunakan faktor skala agar parameter yang digunakan menjadi setara. Parameter tersebut meliputi jarak ( $x, y, \lambda$ ), tegangan listrik ( $\psi, V$ ), konsentrasi pembawa muatan ( $n, p, N$ ), konstanta difusi pembawa muatan ( $D_n, D_p$ ). Beberapa faktor skala dan parameter setelah mengalami penyetaraan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

### 3.3.3 Pengaturan Kondisi Batas

Kondisi batas suatu bahan dapat ditentukan dengan menggunakan batas Neumann dan batas Dirichlet. Batas Neuman adalah spesifikasi nilai derivatif pada batas domain. Pada penelitian ini untuk batas kontak konduktor atau logam (daerah 2 dan 5) digunakan batas Neumann. Batas Neumann ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\psi = V + \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right) \quad (3.1)$$

$$n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.2)$$

$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.3)$$

$N$  adalah besar konsentrasi dopan yang dapat ditentukan dengan persamaan (3.4) sebagai berikut:

$$N = ND_n + ND_{nmax} e^{-\left(\frac{y+y_1}{ch}\right)^2} - NA_{pmax} e^{-\left(\frac{y}{ch}\right)^2} \left( (x < ac) + (x \geq ac) e^{-\left(\frac{x-ac}{ch}\right)^2} \right) \quad (3.4)$$

$$ch = \frac{ju}{\sqrt{\log\left(\frac{NA_{pmax}}{ND_n}\right)}} \quad (3.5)$$

Keterangan:

$ND_n$  = konsentrasi donor pada daerah tipe-n ( $1 \times 10^{15}$ )  $\text{cm}^{-2}$

$ND_{nmax}$  = konsentrasi donor tertinggi tipe-n ( $1 \times 10^{17}$ )  $\text{cm}^{-2}$

$NA_{pmax}$  = konsentrasi akseptor tertinggi tipe-p ( $1 \times 10^{17}$ )  $\text{cm}^{-2}$

$ac$  = panjang batas 5 pada geometri diode ( $2 \mu\text{m}$ )

$ju$  = panjang batas 6 pada geometri diode ( $1 \mu\text{m}$ )

$y_1$  = panjang geometri diode ( $7 \mu\text{m}$ )

Pada persamaan (3.4) ada dua kondisi yang memenuhi persamaan tersebut. Jika nilai  $x$  yang dimasukkan bernilai lebih kecil dari nilai  $ac$  maka yang digunakan suku yang pertama. Ketika nilai  $x$  melebihi nilai  $ac$ , maka digunakan persamaan (3.4) dengan suku yang kedua.

Daerah batas yang menggunakan batas Dirichlet adalah batas 1, 3, 4, 6, 7, 8 dan 9. Batas Dirichlet adalah spesifikasi nilai penyelesaian pada batas domain yang ditentukan dengan persamaan (3.6), (3.7) dan (3.8) sebagai berikut:

$$\hat{n} \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.6)$$

$$\hat{n} \cdot \vec{j}_n = 0 \quad (3.7)$$

$$\hat{n} \cdot \vec{j}_p = 0 \quad (3.8)$$

(Daniellson, 2000).

### 3.3.4 Persamaan Poisson dan Kontinuitas

Persamaan dasar semikonduktor digunakan untuk mendapatkan solusi PDE. Persamaan dasar semikonduktor yaitu Persamaan Poisson dan Kontinuitas. Persamaan Poisson yang ditunjukkan pada persamaan (2.26) merupakan divergensi medan listrik. Komponen yang ada persamaan tersebut berupa konsentrasi pembawa muatan dan konsentrasi impuritas. Ketika diberi variasi temperatur pada dioda Silikon, konsentrasi atom impuritas dianggap terionisasi seluruhnya. Sehingga persamaan Poisson yang digunakan menjadi

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon} (n - p - N) \quad (3.9)$$

Komponen arus elektron ( $j_n$ ) dan arus *hole* ( $j_p$ ) yang digunakan dalam simulasi dioda Silikon ditunjukkan pada persamaan (2.22) dan (2.23). Nilai arus *drift* yang dihasilkan sangat kecil, sehingga hanya arus difusi yang berpengaruh terhadap nilai arus total pembawa muatan. Persamaan komponen pembawa muatan menjadi

$$j_p^T = -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.10)$$

$$j_n^T = +qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.11)$$

Persamaan kontinuitas pada material semikonduktor dikenal dengan persamaan Generasi (G) dan Rekombinasi (R). Pada penelitian ini dioda yang dimodelkan bersifat ideal, sehingga tidak terjadi proses generasi di dalamnya. Oleh karena itu persamaan rapat arus muatan pada material semikonduktor menjadi

$$\nabla j_n = +qR_{SRH} \quad (2.33)$$

$$\nabla j_p = -qR_{SRH} \quad (2.34)$$

### 3.3.5 Pembuatan Grafik Hubungan antara Konsentrasi Pembawa Muatan dan Temperatur

Grafik hubungan antara konsentrasi pembawa muatan dan temperatur dibuat dengan memasukkan variasi temperatur operasional yang digunakan. Selain itu mobilitas pembawa muatan juga divariasikan yang merupakan fungsi dari temperatur. Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi dengan variasi temperatur  $-50^\circ\text{C}$  hingga  $200^\circ\text{C}$  dan variasi mobilitas muatan (*electron* dan *hole*). Dari hasil simulasi diperoleh besar konsentrasi pembawa muatan pada tiap daerah. Daerah yang diamati adalah daerah anoda, katoda dan persambungan. Pada daerah katoda dilakukan pengamatan pada titik koordinat (0,2;-0,7). Untuk daerah persambungan dilakukan pengamatan pada titik (0,1;-0,1). Sedangkan pada daerah anoda dilakukan pengamatan pada titik koordinat (0,2;0,0). Pada penelitian ini temperatur hanya berpengaruh terhadap mobilitas pembawa muatan dan konsentrasi pembawa muatan. Konsentrasi impuritas dianggap terionisasi secara sempurna dan mengalami rekombinasi dengan pembawa muatan atom intrinsik. Hasil simulasi dimana mobilitas pembawa muatan divariasikan terhadap temperatur dibandingkan dengan hasil simulasi dimana mobilitas pembawa muatan dianggap konstan. Titik pengamatan pada data kontrol sama dengan titik pengamatan pada data hasil. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh variasi mobilitas pembawa muatan terhadap nilai konsentrasi pembawa muatan pada dioda Silikon.

### 3.4 Analisis Data

Pada penelitian ini dihasilkan profil distribusi pembawa muatan terhadap variasi temperatur operasional, dimana mobilitas muatan merupakan fungsi dari temperatur. Analisis data pengaruh temperatur terhadap distribusi pembawa muatan dilakukan dengan cara membandingkan hasil grafik yang dihasilkan dengan grafik kontrol, yaitu grafik konsentrasi pembawa muatan dengan variasi temperatur dimana mobilitas pembawa muatan dianggap konstan. Untuk mengetahui besar konsentrasi pembawa muatan pada dioda Silikon maka dilakukan pengamatan di beberapa titik, yaitu di dekat anoda, pada persambungan (*junction*), dan di dekat katoda yang didasarkan pada penelitian Kurniawan (2013). Alasan lain mengapa dilakukan pengamatan di ketiga titik tersebut karena ketika dioda diberi variasi temperatur, maka terjadi deplesi yang akan menghasilkan medan listrik di daerah sekitar persambungan. Arus listrik yang dihasilkan oleh divais dioda akan mengalir dari anoda menuju katoda. Ketika diperoleh nilai konsentrasi pembawa muatan terhadap variasi temperatur dimana juga memperhitungkan nilai mobiltas muatannya, dibuatlah grafik yang menyatakan hubungan antara konsentrasi pembawa muatan terhadap temperatur pada masing-masing lokasi yang telah ditentukan. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan data kontrol, sehingga maksudkan untuk mengetahui pengaruh mobilitas pembawa muatan terhadap nilai konsentrasi pembawa muatan akibat adanya efek hamburan impurutas terionisasi.

## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi yang akan dibahas pada tugas akhir ini berupa profil distribusi pembawa muatan serta pengaruh temperatur operasional dan mobilitas pembawa muatan terhadap konsentrasi pembawa muatan dioda Silikon akibat efek hamburan impuritas terionisasi. Hasil simulasi diperoleh dengan menyelesaikan persamaan Poisson yang berlaku pada dioda Silikon.

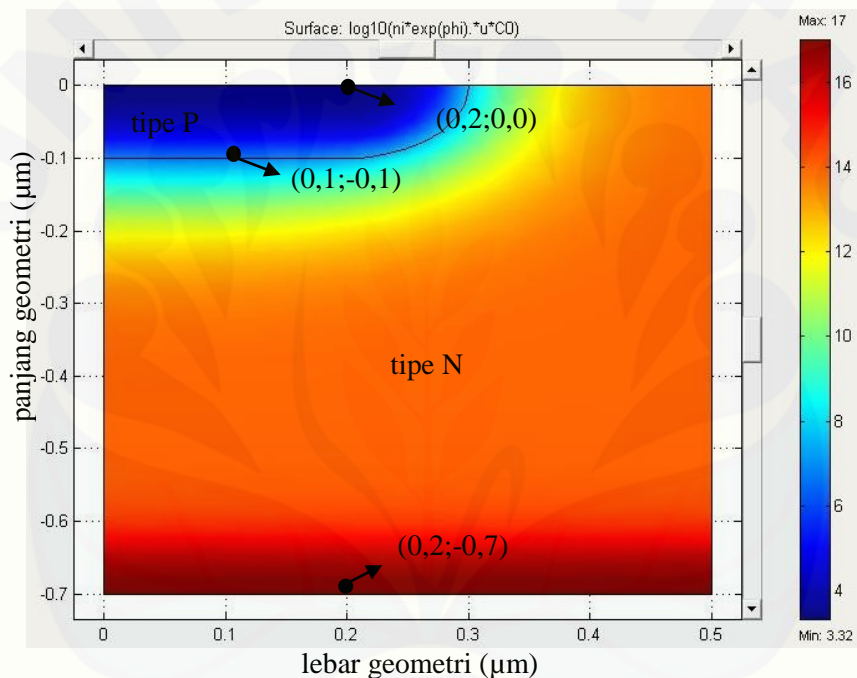
### 4.1 Pemodelan Distribusi Elektron Akibat Peristiwa Hamburan Impuritas Terionisasi pada Dioda Silikon

Hasil simulasi yang diperoleh berupa profil distribusi pembawa muatan dioda Silikon akibat peristiwa hamburan impuritas terionisasi. Distribusi pembawa muatan yang dihasilkan terdiri dari distribusi elektron dan distribusi *hole*. Hasil distribusi elektron akibat peristiwa hamburan impuritas terionisasi yang disebabkan oleh perubahan temperatur operasional dengan variasi mobilitas elektron akan dibandingkan dengan distribusi elektron tanpa memperhitungkan perubahan mobilitas elektron yang ada. Perbandingan ini dilakukan secara kuantitatif.

Profil distribusi konsentrasi elektron ditunjukkan pada Gambar 4.1. Perubahan konsentrasi elektron dalam hal ini ditunjukkan melalui sebaran warna di seluruh daerah geometri dioda Silikon. Data mobilitas elektron pada profil tersebut menggunakan nilai  $\mu = 1800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa daerah tipe-p berwarna biru (titik pengamatan (2,0;0,0)) menunjukkan besar konsentrasi sekitar  $(3 \times 10^4) \mu\text{m}^{-2}$ , sedangkan pada daerah tipe-n (titik pengamatan (0,2;-0,7)) menunjukkan warna merah yang mewakili konsentrasi sebesar  $(1 \times 10^{17}) \mu\text{m}^{-2}$ . Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi elektron pada daerah tipe-n lebih besar daripada di daerah tipe-p. Di sekitar ujung daerah tipe-p konsentrasi



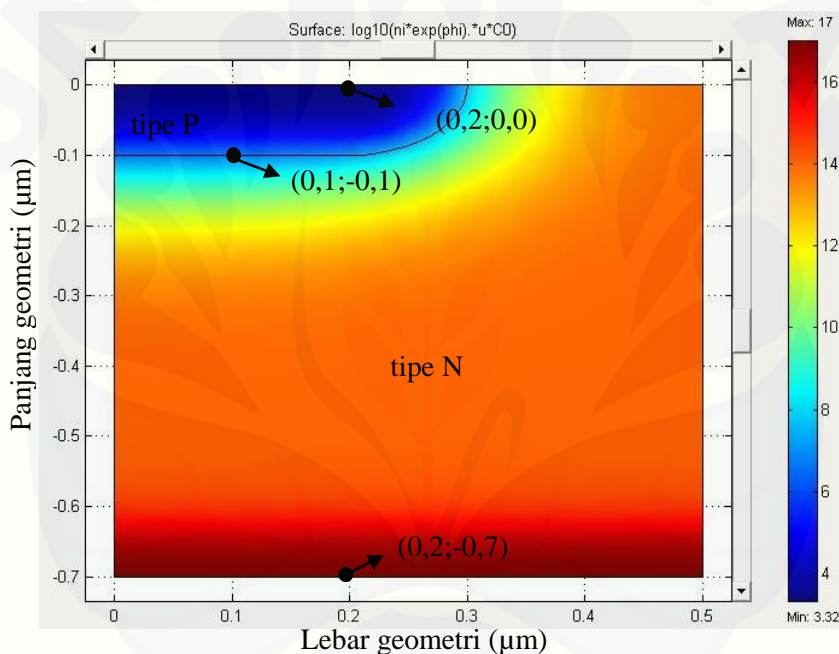
elektron menunjukkan nilai terendah, namun semakin mendekati ujung tipe-n konsentrasi elektron semakin bertambah. Pada daerah persambungan (titik pengamatan  $(0,1;-0,1)$ ), konsentrasi elektron ditunjukkan oleh warna biru muda yang mewakili konsentrasi sekitar  $(6 \times 10^7) \mu m^{-2}$ . Pada daerah persambungan ini, frekuensi terjadinya perubahan lapisan warna cukup rapat. Ini mengindikasikan bahwa jumlah elektron pada daerah tersebut cepat mengalami perubahan. Terdapat tiga lapisan warna dalam rentang jarak geometri  $(-0,1$  hingga  $-0,25) \mu m$ .



Gambar 4.1 Hasil simulasi profil distribusi konsentrasi elektron pada temperatur  $0^{\circ}C$  dengan mobilitas elektron  $\mu = 1800 \text{ cm/Vs}$ .

Hasil distribusi elektron akibat adanya peristiwa hamburan impuritas terionisasi dengan mobilitas elektron konstan sebesar  $\mu = 800 \text{ cm/Vs}$  ditunjukkan pada Gambar 4.2. Sama halnya dengan profil sebelumnya, distribusi elektron pada daerah tipe-n memiliki konsentrasi elektron paling banyak. Hal ini ditunjukkan dengan warna merah (titik pengamatan  $(0,2;-0,7)$ ) yang merepresentasikan konsentrasi sebesar  $(1 \times 10^{18}) \mu m^{-2}$ . Pada saat melewati daerah persambungan, konsentrasi

elektron mengalami penurunan. Nampak bahwa saat menuju ke persambungan elektron cepat sekali mengalami perubahan konsentrasi, yang ditunjukkan dengan cukup rapatnya perubahan lapisan warna yang terjadi. Dari daerah katoda, konsentrasi elektron berubah dari warna jingga sekitar  $(3 \times 10^{14}) \mu m^{-2}$ , berubah menjadi kuning (konsentrasi sekitar  $(1 \times 10^{12}) \mu m^{-2}$ ) dan menjadi biru muda tepat di daerah persambungan (konsentrasi sekitar  $(1 \times 10^7) \mu m^{-2}$ ). Adapun daerah tipe-p memiliki konsentrasi elektron paling kecil (titik pengamatan  $(0,2;0,0)$ ) yang ditunjukkan oleh warna biru (konsentrasi  $(3 \times 10^4) \mu m^{-2}$ ).



Gambar 4.2 Hasil simulasi profil distribusi konsentrasi elektron pada temperatur  $0^{\circ}C$  dengan mobilitas elektron konstan sebesar  $\mu = 800 \text{ cm}^2/Vs$  (kontrol).

Pengamatan distribusi elektron pada geometri dioda Silikon dilakukan pada tiga titik, yaitu di daerah anoda, persambungan dan katoda. Koordinat yang diamati pada geometri dari dioda kontrol sama dengan koordinat geometri dari dioda dengan perlakuan variasi mobilitas elektron. Hal ini dimaksudkan untuk membandingkan nilai konsentrasi elektron akibat adanya variasi mobilitas elektron dengan nilai konsentrasi elektron yang mana mobilitasnya dianggap konstan.

Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan bahwa konsentrasi elektron di daerah tipe-n lebih besar jika dibandingkan dengan konsentrasi elektron pada tipe-p. Hal ini sesuai dengan teori bahwa elektron pada daerah tipe-p lebih dominan dibandingkan dengan daerah tipe-n (Malvino, 1979). Pemberian variasi temperatur dari  $-50^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $200^{\circ}\text{C}$  pada geometri yang dimodelkan, menghasilkan perubahan pada konsentrasi elektron. Hasil simulasi profil distribusi elektron akibat hamburan impuritas terionisasi dengan variasi temperatur, dimana mobilitas elektron diperhitungkan, dapat dilihat pada lampiran A.1. Pada lampiran tersebut gambar yang ditunjukkan secara kasat mata tampak sama pada setiap temperatur dan mobilitas elektron yang divariasikan. Namun jika diamati lebih lanjut pada daerah di dekat katoda, anoda dan persambungan, maka konsentrasi elektron akan mengalami perubahan seiring dengan perubahan temperatur, yang sekaligus mengindikasikan perubahan mobilitas muatan. Tabel 4.1 menunjukkan besarnya konsentrasi elektron akibat hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas elektron diperhitungkan.

Tabel 4.1 Konsentrasi elektron akibat hamburan impuritas terionisasi dengan variasi mobilitas muatan

Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Mobilitas elektron $\times 10^4 (\mu\text{m}/\text{Vs})$	Konsentrasi Elektron ( $\mu\text{m}^{-2}$ )		
		Dekat Katoda	Persambungan	Dekat Anoda
-50	2800	$1,70000 \times 10^{17}$	$6,80966 \times 10^7$	$3,32513 \times 10^4$
0	1800	$1,70001 \times 10^{17}$	$6,68985 \times 10^7$	$3,33115 \times 10^4$
50	1200	$1,70001 \times 10^{17}$	$6,63302 \times 10^7$	$3,33350 \times 10^4$
100	800	$1,70004 \times 10^{17}$	$6,55830 \times 10^7$	$3,33239 \times 10^4$
150	600	$1,70004 \times 10^{17}$	$6,50085 \times 10^7$	$3,32443 \times 10^4$
200	500	$1,70004 \times 10^{17}$	$6,43507 \times 10^7$	$3,33359 \times 10^4$

Tabel 4.1 menunjukkan besarnya konsentrasi elektron pada daerah katoda, persambungan dan daerah anoda pada variasi temperatur dari  $-50^{\circ}\text{C}$  hingga  $200^{\circ}\text{C}$ . Perubahan temperatur operasional ini mengakibatkan terjadinya hamburan impuritas terionisasi yang menyebabkan berubahnya mobilitas elektron (Sze, 1981). Peristiwa ini menyebabkan perubahan pada konsentrasi elektron. Pada daerah katoda

konsentrasi elektron mengalami peningkatan. Konsentrasi elektron pada daerah persambungan cenderung menurun ketika temperatur ditingkatkan. Ketika temperatur yang diberikan ke divais ditingkatkan, maka konsentrasi elektron yang ada pada daerah anoda mengalami perubahan. Perubahan yang terjadi pada konsentrasi elektron di daerah anoda bersifat fluktuatif.

Hasil simulasi profil distribusi elektron akibat hamburan impuritas terionisasi dengan variasi temperatur, dimana mobilitas elektron dianggap konstan, dapat dilihat pada lampiran A.2. Pada lampiran tersebut gambar yang ditunjukkan secara kasat mata tampak sama pada setiap perubahan temperatur. Namun jika diamati lebih lanjut pada daerah katoda, anoda dan persambungan, maka konsentrasi elektron akan mengalami perubahan seiring dengan perubahan temperatur. Tabel 4.2 menunjukkan besarnya konsentrasi elektron sebagai fungsi temperatur yang mengakibatkan terjadinya hamburan impuritas terionisasi, namun mobilitas muatan dianggap konstan.

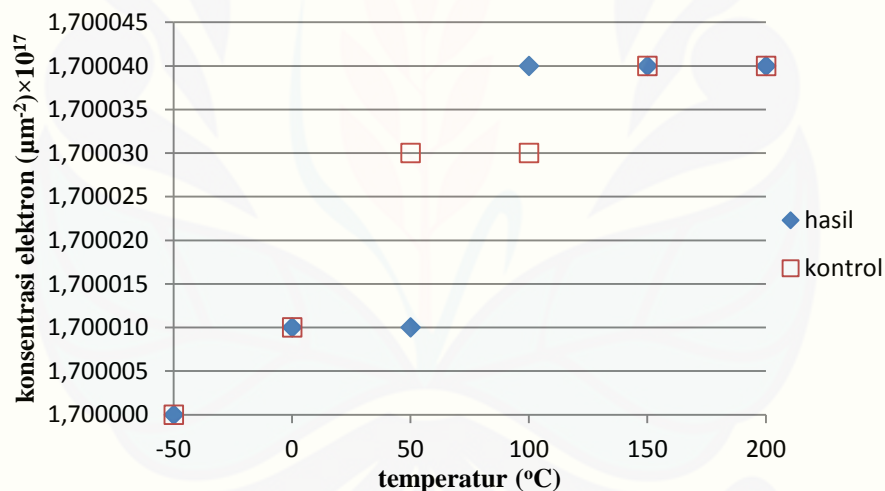
Tabel 4.2 Konsentrasi elektron akibat adanya efek hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas muatan dianggap konstan ( $\mu = 800 \times 10^4 \mu\text{m}/\text{Vs}$ ) (data kontrol)

Temperatur (°C)	Konsentrasi Elektron ( $\mu\text{m}^{-2}$ )		
	Dekat Katoda	Persambungan	Dekat Anoda
-50	$1,70000 \times 10^{17}$	$6,80035 \times 10^7$	$3,33633 \times 10^4$
0	$1,70001 \times 10^{17}$	$6,71725 \times 10^7$	$3,33636 \times 10^4$
50	$1,70003 \times 10^{17}$	$6,63352 \times 10^7$	$3,33640 \times 10^4$
100	$1,70003 \times 10^{17}$	$6,55755 \times 10^7$	$3,33758 \times 10^4$
150	$1,70004 \times 10^{17}$	$6,49596 \times 10^7$	$3,33656 \times 10^4$
200	$1,70004 \times 10^{17}$	$6,45013 \times 10^7$	$3,33653 \times 10^4$

Tabel 4.2 menunjukkan besarnya konsentrasi elektron akibat adanya efek hamburan impuritas terionisasi tanpa memperhitungkan mobilitas elektron. Data ini dianggap sebagai data kontrol. Tabel tersebut menunjukkan besarnya distribusi elektron di daerah anoda, persambungan dan daerah katoda. Pada daerah katoda, konsentrasi elektron mengalami peningkatan ketika temperatur operasional dinaikkan. Hal sebaliknya terjadi pada daerah persambungan dan daerah anoda

bahwa ketika temperatur dinaikkan maka konsentrasi elektron pada daerah tersebut cenderung menurun. Pada data kontrol, perubahan mobilitas dianggap tidak menyebabkan terjadinya perubahan konsentrasi elektron. Terjadinya perubahan konsentrasi diakibatkan oleh adanya perubahan energi yang diterima oleh pembawa muatan (elektron), sehingga merubah potensial elektrostatik dalam bahan dan menyebabkan jumlah pembawa muatan berubah (Puri, 2001).

Untuk mengetahui perbedaan konsentrasi elektron sebagai fungsi temperatur antara peristiwa hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas elektron divariasikan dengan mobilitas elektron dianggap konstan, maka dibuat grafik hubungan antara konsentrasi elektron yang ditunjukkan oleh data pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Grafik hubungan antara konsentrasi elektron terhadap variasi temperatur operasional pada daerah katoda ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara temperatur terhadap konsentrasi elektron pada daerah katoda

Grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3 memperlihatkan hubungan antara temperatur operasional terhadap distribusi elektron di daerah katoda. Berdasarkan kurva hasil tersebut, ketika temperatur dinaikkan dari  $-50^{\circ}\text{C}$  ke  $0^{\circ}\text{C}$  konsentrasi elektron baik pada kurva hasil (warna biru) maupun kurva kontrol (warna merah) mengalami peningkatan. Peningkatan konsentrasi elektron pada kurva dengan adanya

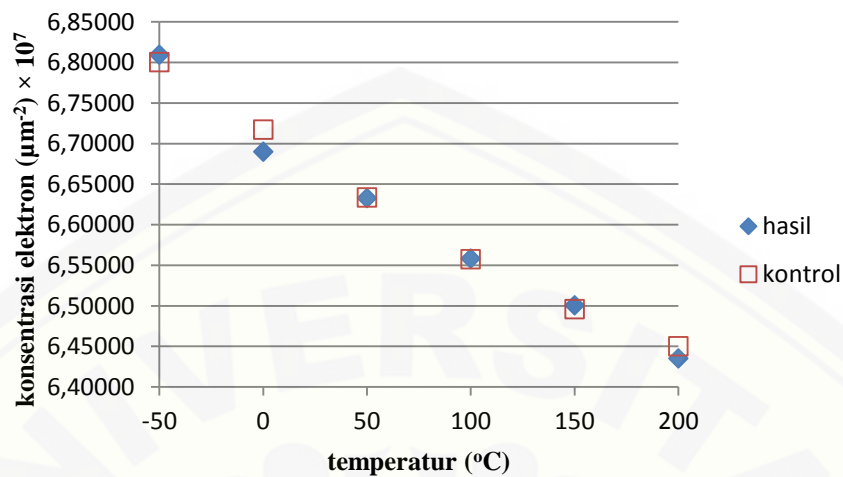
variasi mobilitas elektron maupun mobilitas elektron dianggap konstan sebesar  $(0.00001 \times 10^{17}) \mu m^{-2}$ . Pada kurva hasil, mobilitas elektron merupakan fungsi dari temperatur. Besarnya mobilitas elektron berbanding terbalik dengan peningkatan temperatur operasional. Temperatur operasional yang diaplikasikan pada dioda Silikon sebanding dengan konsentrasi elektron yang ada. Sehingga ketika temperatur dinaikkan, konsentrasi elektron pada dioda Silikon mengalami peningkatan (Sze, 1981). Pada temperatur  $-50^{\circ}C$  ke  $0^{\circ}C$  mobilitas elektron yang ada pada suatu bahan menurun, sedangkan besarnya konsentrasi elektron pada daerah sekitar katoda meningkat. Kondisi ini bersesuaian dengan teori yang ada. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

Ketika dioda Silikon diberikan temperatur sebesar  $50^{\circ}C$ , besar konsentrasi elektron akibat pengaruh variasi mobilitas elektron tidak mengalami perubahan. Hasil tersebut mengacu pada Tabel 4.1. Namun, ketika mobilitas elektron dianggap konstan, nilai konsentrasi elektron pada daerah katoda mengalami peningkatan. Besarnya kenaikan konsentrasi elektron pada temperatur tersebut sebesar  $(0.00002 \times 10^{17}) \mu m^{-2}$ . Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2. Keadaan sebaliknya terjadi saat temperatur yang diterapkan pada dioda Silikon sebesar  $100^{\circ}C$ . Pada temperatur tersebut, konsentrasi elektron yang mana nilai mobilitas elektron diperhitungkan mengalami peningkatan yang cukup besar. Pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi elektron sebesar  $(0.00003 \times 10^{17}) \mu m^{-2}$ . Konsentrasi elektron pada daerah katoda akibat kenaikan temperatur sebesar  $100^{\circ}C$ , dimana besarnya mobilitas elektron dianggap konstan tidak mengalami perubahan. Hal ini ditunjukkan oleh Tabel 4.2. Pada temperatur  $50^{\circ}C$  dan  $100^{\circ}C$  besar konsentrasi elektron pada kondisi yang berbeda (ditinjau berdasarkan ada tidaknya variasi mobilitas elektron) menunjukkan perbedaan yang besar. Hal ini dikarenakan besarnya nilai mobilitas elektron yang ada pada dioda Silikon sangat berpengaruh terhadap nilai distribusi elektron.

Peningkatan konsentrasi elektron terjadi pada temperatur 150°C. Perubahan konsentrasi hanya terjadi untuk kondisi dimana mobilitas muatan dianggap konstan. Meninjau dari Tabel 4.2, besarnya perubahan konsentrasi elektron pada kondisi ini adalah  $(0.00001 \times 10^{17})\mu m^{-2}$ . Pada temperatur 150°C, penurunan mobilitas elektron tidak memberikan efek pada konsentrasi elektron pada daerah katoda. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1. Ketika temperatur operasional dinaikkan lagi hingga 200°C konsentrasi elektron tidak mengalami peningkatan baik ketika mobilitas muatan bervariasi terhadap temperatur maupun dianggap konstan. Nilai konsentrasi elektron pada kedua kondisi ini ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Di daerah katoda pada temperatur 200°C, dapat dikatakan bahwa perubahan mobilitas elektron tidak memberikan kontribusi yang besar terhadap perubahan nilai distribusi elektron. Oleh karena itu, pada temperatur 200°C perubahan mobilitas muatan dapat diabaikan.

Daerah berikutnya yang diamati adalah daerah persambung lapisan-p dan lapisan-n. Gambar 4.4 menunjukkan grafik konsentrasi elektron pada daerah persambungan akibat variasi mobilitas muatan elektron yang merupakan fungsi dari temperatur operasional dengan mobilitas muatan yang dianggap konstan.

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 merupakan perbandingan antara besarnya konsentrasi elektron dengan memperhitungkan variasi mobilitas elektron (warna biru) dan konsentrasi elektron dengan menganggap mobilitas elektron konstan (warna merah). Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa semakin besar temperatur yang diberikan pada dioda Silikon, maka konsentrasi elektron semakin menurun. Peristiwa ini disebabkan adanya proses rekombinasi pembawa muatan pada daerah persambungan (Danielson, 2000).



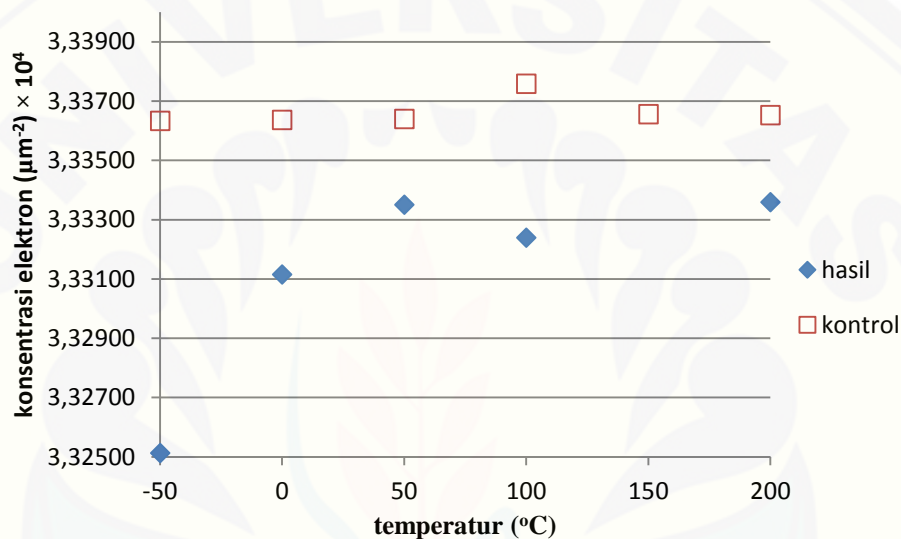
Gambar 4.4 Grafik hubungan antara temperatur terhadap konsentrasi elektron pada daerah persambungan

Penurunan konsentrasi elektron akibat peningkatan temperatur operasional berlaku pada kedua kondisi dengan perlakuan yang berbeda. Penurunan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Pada setiap kenaikan temperatur operasional, dimana nilai kelincahan gerak elektron divariasikan, terdapat selisih nilai distribusi elektron jika dibandingkan dengan nilai distribusi elektron ketika mobilitas elektron dianggap konstan. Dengan demikian, untuk menentukan nilai konsentrasi elektron pada daerah persambungan harus memperhitungkan nilai mobilitas elektron yang dimiliki. Pada daerah persambungan terjadi proses rekombinasi antara muatan positif dan muatan negatif yang dimiliki oleh masing-masing lapisan. Ketika terjadi keseimbangan, pada daerah persambungan muatan nya bersifat netral. Namun pada hasil simulasi pada daerah persambungan baik dengan variasi mobilitas maupun mobilitas elektron dianggap konstan terdapat nilai konsentrasi elektron. Hal ini dikarenakan masih adanya pergerakan elektron. Jika muatan sudah tidak berdifusi, maka besarnya konsentrasi elektron bernilai nol, dalam kata lain bersifat netral.

Anoda merupakan daerah berikutnya yang diamati. Distribusi elektron pada daerah anoda akibat variasi mobilitas muatan elektron yang merupakan fungsi dari temperatur operasional dengan mobilitas muatan yang dianggap konstan ditunjukkan



pada Gambar 4.5. Pada gambar tersebut terdapat dua kurva, kurva warna biru menunjukkan data hasil sedangkan kurva warna merah menunjukkan data kontrol. Ketika mobilitas elektron bervariasi terhadap temperatur, terjadi perubahan nilai distribusi elektron pada setiap kenaikan temperatur yang diaplikasikan pada dioda Silikon. Begitu juga yang terjadi pada distribusi elektron pada peristiwa hamburan impuritas dimana mobilitas elektron dianggap konstan.



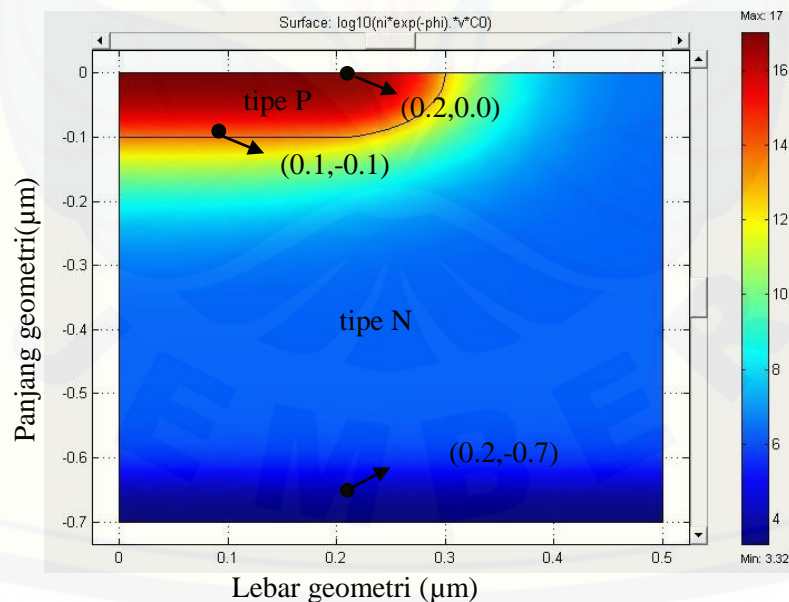
Gambar 4.5 Grafik hubungan antara temperatur terhadap konsentrasi elektron pada daerah anoda

Pada temperatur  $-50^{\circ}\text{C}$  hingga  $50^{\circ}\text{C}$ , baik mobilitas elektron divariasikan maupun dianggap konstan, terjadi peningkatan jumlah konsentrasi elektron. Peningkat konsentrasi ini dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Ketika diberikan temperatur sebesar  $100^{\circ}\text{C}$  pada dioda Silikon dimana memperhitungkan perubahan mobilitas muatan, konsentrasi elektron pada daerah anoda menurun yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Hal sebaliknya terjadi pada kondisi dimana nilai mobilitas elektron dianggap konstan. Pada Tabel 4.2 menunjukkan bahwa konsentrasi elektron pada temperatur tersebut meningkat. Konsentrasi elektron pada kedua kondisi pengamatan menurun ketika diberikan temperatur sebesar  $150^{\circ}\text{C}$ . Saat temperatur sebesar  $200^{\circ}\text{C}$  diterapkan pada dioda Silikon dan mobilitas elektron divariasikan, terjadi

peningkatan konsentrasi elektron. Hal sebaliknya terjadi pada kondisi dimana mobilitas elektron dianggap konstan. Pada keadaan ini, nilai konsentrasi elektron justru semakin menurun. Jika dibandingkan dengan data kontrol, besarnya nilai konsentrasi elektron pada masing-masing kenaikan temperatur dimana mobilitas elektron divariasikan lebih kecil. Dari kurva yang ada, tampak bahwasanya konsentrasi elektron sebagai kontrol berada di atas kurva hasil. Hal ini hanya terjadi pada daerah dengan konsentrasi elektron minoritas. Pada daerah anoda, konsentrasi elektron merupakan muatan minoritas, sehingga pada daerah tersebut pola konsentrasi elektron data hasil lebih kecil jika dibanding dengan data kontrol.

#### 4.2 Pemodelan Distribusi *Hole* Akibat Peristiwa Hamburan Impuritas Terionisasi pada Dioda Silikon

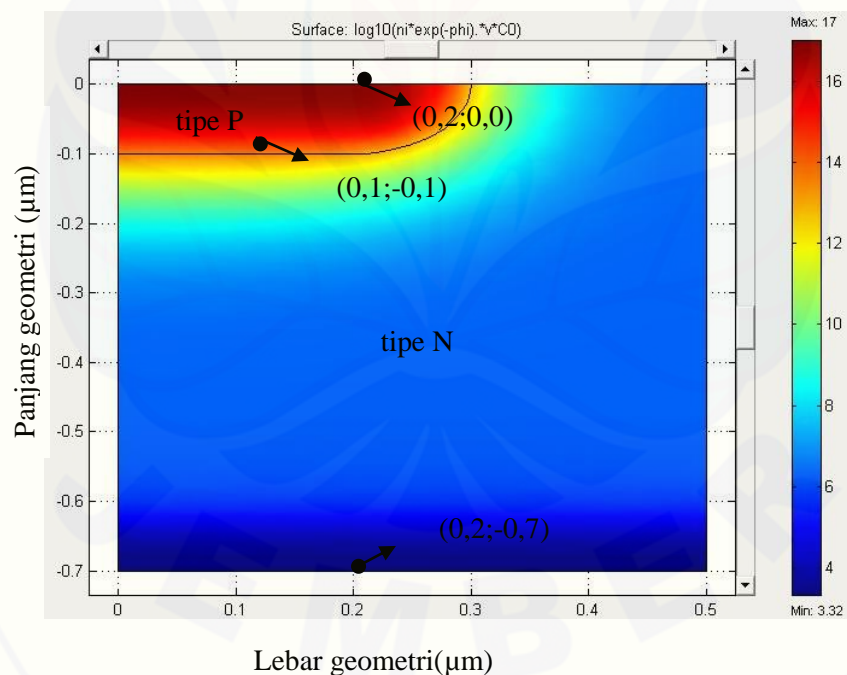
Selain dihasilkan distribusi elektron, pada penelitian ini juga dihasilkan profil distribusi *hole* akibat peristiwa hamburan impuritas terionisasi. Gambar 4.6 menunjukkan profil distribusi *hole* pada dioda Silikon disebabkan adanya peristiwa hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas *hole* diperhitungkan.



Gambar 4.6 Hasil simulasi profil distribusi konsentrasi *hole* pada temperatur 0°C dengan mobilitas *hole*  $\mu = 850 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .

Nilai mobilitas *hole* yang digunakan sebesar  $\mu = 850 \text{ cm/Vs}$ . Konsentrasi *hole* tertinggi yang tampak pada gambar tersebut terdapat pada daerah di dekat anoda. Hal ini ditunjukkan oleh warna merah yang mengindikasikan bahwa konsentrasi *hole* sekitar  $(1,6 \times 10^{17})\mu\text{m}^{-2}$  pada titik koordinat  $(0,2;0,0)$ . Semakin mendekati daerah katoda konsentrasi *hole* yang tersebar semakin kecil. Hal ini ditunjukkan dengan perubahan warna yang terdapat pada geometri dioda. Pada daerah persambungan  $(0,1;-0,1)$  ditunjukkan oleh warna kuning yang mewakili konsentrasi *hole* sebesar  $(1,3 \times 10^{15})\mu\text{m}^{-2}$ . Konsentrasi *hole* paling kecil terdapat pada ujung katoda yang ditunjukkan dengan warna biru yang mewakili konsentrasi sebesar  $(3,3 \times 10^4)\mu\text{m}^{-2}$ .

Hasil simulasi berikutnya adalah profil distribusi konsentrasi *hole* pada dioda Silikon akibat efek hamburan impuritas terionisasi, dimana mobilitas *hole* dianggap konstan sebesar  $200 \text{ cm/Vs}$ . Profil dari distribusi *hole* ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hasil simulasi profil distribusi konsentrasi *hole* pada temperatur  $0^\circ\text{C}$  dengan mobilitas elektron konstan sebesar  $\mu = 200 \text{ cm/Vs}$  (kontrol).

Pada gambar tersebut terlihat bahwa konsentrasi *hole* terbanyak berada di ujung anoda yang ditandai dengan warna merah (konsentrasi sekitar  $(1,6 \times 10^{17})\mu m^{-2}$ ). Pengamatan di daerah anoda dilakukan pada titik (0,2;0,0). Penurunan konsentrasi *hole* terlihat ketika mendekati daerah persambungan. Konsentrasi *hole* di daerah persambungan (0,1;-0,1) sekitar  $(1,3 \times 10^{14})\mu m^{-2}$  yang ditunjukkan oleh warna kuning. Semakin mendekati daerah katoda, konsentrasi *hole* yang ada pada dioda Silikon mengalami penurunan. Perubahan distribusi *hole* ini ditandai dengan perubahan warna dari kuning menuju ke biru muda kemudian berubah menjadi warna biru tua. Konsentrasi *hole* paling kecil berada di daerah katoda. Pada kondisi dimana mobilitas *hole* dianggap konstan, distribusi *hole* pada dioda Silikon mengalami perubahan ketika temperatur operasional ditingkatkan. Hal ini sesuai dengan teori yang ada, bahwa konsentrasi *hole* paling tinggi berada di daerah anoda. Pada daerah anoda, *hole* merupakan pembawa muatan mayoritas. Oleh karena itu konsentrasi *hole* paling kecil ditemukan pada daerah katoda (Fukuda, 1999).

Pengamatan distribusi *hole* pada geometri dioda Silikon dilakukan pada tiga titik, yaitu di daerah anoda, persambungan dan katoda. Koordinat yang diamati pada geometri dioda kontrol sama dengan koordinat geometri dari dioda dengan perlakuan variasi mobilitas *hole*. Hal ini dimaksudkan untuk membandingkan nilai konsentrasi *hole* akibat adanya variasi mobilitas *hole* terhadap nilai konsentrasi *hole* yang mana mobilitasnya dianggap konstan.

Gambar 4.6 menunjukkan konsentrasi *hole* dengan variasi temperatur dari  $-50^{\circ}\text{C}$  hingga  $200^{\circ}\text{C}$  akibat efek hamburan impuritas terionisasi dengan mobilitas *hole* diperhitungkan. Profil distribusi *hole* dengan variasi nilai mobilitas *hole* dapat dilihat pada lampiran B.1. Jika dilihat secara sepintas tidak terdapat perbedaan konsentrasi *hole* setiap kenaikan temperatur. Perubahan konsentrasi *hole* lebih detail yang mewakili daerah anoda, daerah persambungan dan daerah katoda, ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Konsentrasi *hole* akibat hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas muatan divariasikan

Temperatur (°C)	Mobilitas <i>hole</i> $\times 10^4 (\mu\text{m}/\text{Vs})$	Konsentrasi <i>Hole</i> ( $\mu\text{m}^{-2}$ )		
		Dekat Katoda	Persambungan	Dekat Anoda
-50	890	$3,32273 \times 10^4$	$1,35132 \times 10^{15}$	$1,69966 \times 10^{17}$
0	850	$3,32258 \times 10^4$	$1,36063 \times 10^{15}$	$1,69864 \times 10^{17}$
50	400	$3,32250 \times 10^4$	$1,37048 \times 10^{15}$	$1,69852 \times 10^{17}$
100	300	$3,32235 \times 10^4$	$1,37644 \times 10^{15}$	$1,69852 \times 10^{17}$
150	250	$3,32234 \times 10^4$	$1,38219 \times 10^{15}$	$1,69851 \times 10^{17}$
200	195	$3,32233 \times 10^4$	$1,38773 \times 10^{15}$	$1,69850 \times 10^{17}$

Berdasarkan hasil simulasi yang ditampilkan pada Tabel 4.3 diketahui bahwa terjadi perubahan konsentrasi *hole* pada setiap titik dengan variasi temperatur dan mobilitas *hole*. Mobilitas muatan menurun seiring bertambahnya temperatur operasional. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada daerah katoda konsentrasi *hole* menurun seiring meningkatnya temperatur operasional. Konsentrasi *hole* pada daerah persambungan meningkat ketika temperatur operasional juga dinaikkan. Namun, konsentrasi *hole* pada daerah anoda cenderung menurun seiring penambahan temperatur operasional.

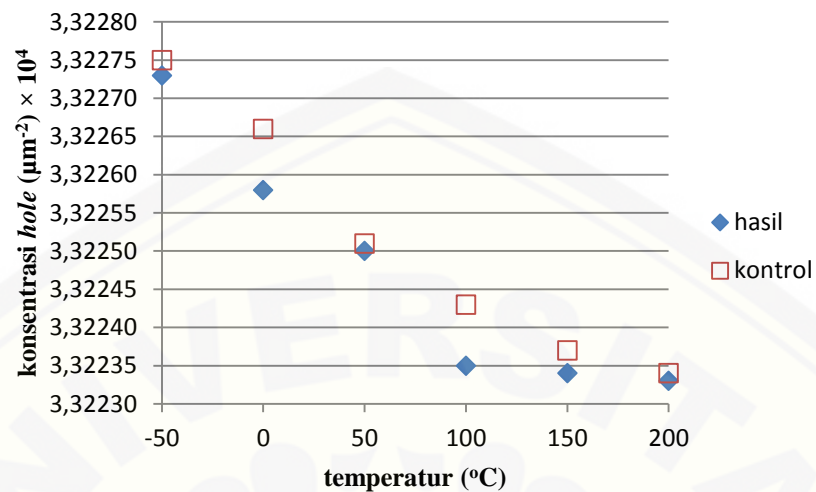
Profil distribusi *hole* akibat hamburan impuritas terionisasi dengan variasi temperatur, dimana nilai mobilitas *hole* dianggap konstan dapat dilihat pada lampiran B.2. Pada lampiran tersebut gambar yang ditunjukkan secara kasat mata tampak sama pada tiap kenaikan temperatur, namun jika diamati secara teliti dan dilihat nilai konsentrasi *hole* setiap titik, maka terdapat perubahan konsentrasi *hole* setiap kenaikan temperatur. Nilai konsentrasi *hole* akibat hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas *hole* dianggap konstan ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Konsentrasi *hole* akibat adanya efek hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas pembawa muatan dianggap konstan ( $\mu=200 \times 10^4 \mu\text{m/Vs}$ ) (data kontrol)

Temperatur (°C)	Konsentrasi <i>Hole</i> ( $\mu\text{m}^{-2}$ )		
	Dekat Katoda	Persambungan	Dekat Anoda
-50	$3,32275 \times 10^4$	$1,35187 \times 10^{15}$	$1,69864 \times 10^{17}$
0	$3,32266 \times 10^4$	$1,36058 \times 10^{15}$	$1,69864 \times 10^{17}$
50	$3,32251 \times 10^4$	$1,36987 \times 10^{15}$	$1,69863 \times 10^{17}$
100	$3,32243 \times 10^4$	$1,37658 \times 10^{15}$	$1,69852 \times 10^{17}$
150	$3,32237 \times 10^4$	$1,38270 \times 10^{15}$	$1,69851 \times 10^{17}$
200	$3,32234 \times 10^4$	$1,38726 \times 10^{15}$	$1,69851 \times 10^{17}$

Tabel 4.4 menunjukkan perubahan konsentrasi *hole* akibat adanya efek hamburan impuritas terionisasi tanpa memvariasikan nilai mobilitas *hole*. Data ini digunakan sebagai data kontrol. Tabel tersebut menunjukkan besarnya konsentrasi *hole* pada daerah katoda, persambungan dan daerah anoda. Konsentrasi *hole* pada daerah katoda dan daerah anoda menurun ketika temperatur operasional dinaikkan. Pada daerah sekitar persambungan besarnya konsentrasi *hole* sebanding dengan perubahan temperatur operasional.

Untuk mengetahui perbedaan nilai konsentrasi *hole* sebagai fungsi dari temperatur akibat peristiwa hamburan impuritas terionisasi dimana mobilitas *hole* divariasikan maupun mobilitas *hole* dianggap konstan pada setiap titik pengamatan, maka dari Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 dapat dibuat plot grafik hubungan antara temperatur operasional terhadap nilai konsentrasi *hole*. Plot grafik hubungan antara temperatur dengan konsentrasi *hole* disajikan untuk daerah katoda, daerah persambungan dan daerah anoda. Grafik hubungan antara konsentrasi *hole* terhadap variasi temperatur operasional pada daerah katoda ditunjukkan pada Gambar 4.8.

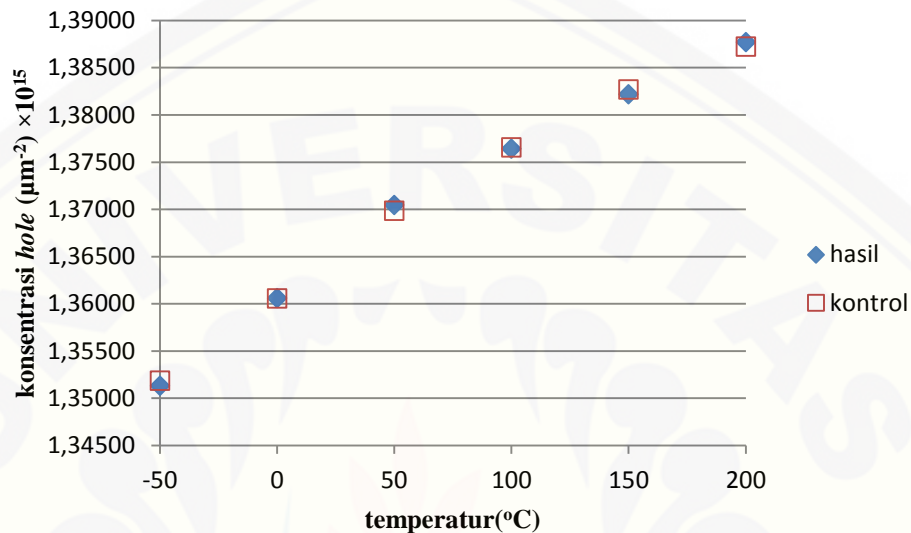


Gambar 4.8 Grafik hubungan antara konsentrasi *hole* terhadap temperatur pada daerah katoda

Konsentrasi *hole* akibat peristiwa hamburan impuritas terionisasi dengan variasi temperatur operasional di daerah katoda ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada gambar tersebut terdapat dua grafik yang menyatakan dua kondisi yang berbeda. Besarnya konsentrasi *hole* dimana nilai mobilitas *hole* diperhitungkan ditunjukkan oleh grafik dengan warna biru. Grafik warna merah menunjukkan nilai konsentrasi *hole* tanpa memperhitungkan perubahan nilai mobilitas *hole* (grafik kontrol). Pada daerah katoda, konsentrasi *hole* mengalami penurunan ketika temperatur operasional dinaikkan. Penurunan konsentrasi *hole* terjadi pada data hasil maupun data kontrol, yang dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4. Jika dibandingkan dengan grafik kontrol, nilai konsentrasi *hole* karena impuritas yang terionisasi dengan memperhitungkan mobilitas *hole* memiliki nilai yang lebih kecil. Nilai konsentrasi *hole* pada daerah katoda dari hasil simulasi menurun seiring bertambahnya temperatur operasional. Hal ini dikarenakan pada daerah katoda, *hole* merupakan muatan minoritas, sehingga ketika temperatur dan mobilitas *hole* divariasikan tidak memberikan kontribusi secara langsung terhadap nilai konsentrasi *hole*.

Daerah berikutnya yang diamati adalah daerah persambungan antara lapisan-p dan lapisan-n. Gambar 4.9 menunjukkan grafik konsentrasi elektron pada daerah

persambungan akibat variasi mobilitas muatan elektron yang merupakan fungsi dari temperatur operasional dengan mobilitas muatan yang dianggap konstan.



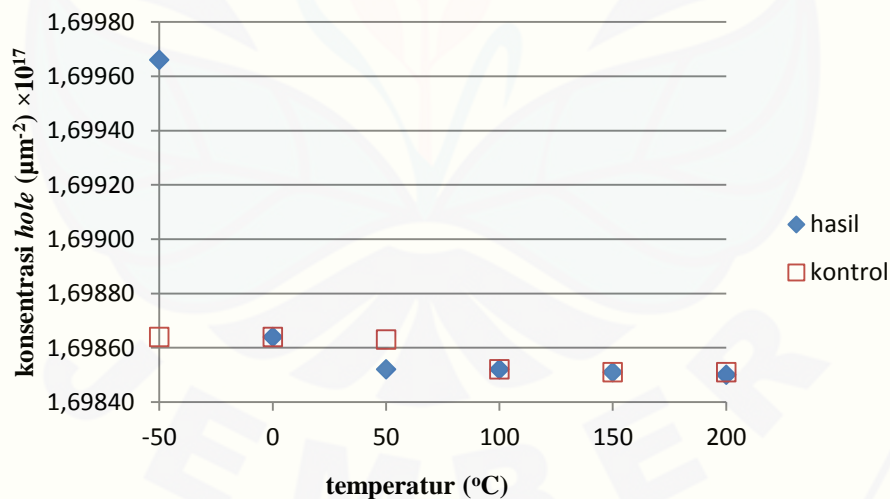
Gambar 4.9 Grafik hubungan antara konsentrasi *hole* terhadap variasi temperatur di daerah persambungan

Pada Gambar 4.9 menunjukkan grafik hubungan antara perubahan temperatur operasional terhadap konsentrasi *hole* pada daerah persambungan. Peningkatan temperatur yang diberikan pada dioda Silikon telah meningkatkan konsentrasi *hole* di daerah persambungan. Peningkatan konsentrasi ini terjadi pada grafik hasil yang ditunjukkan oleh warna biru dan grafik kontrol yang ditunjukkan oleh warna merah. Selain temperatur, konsentrasi *hole* pada grafik hasil juga dipengaruhi oleh besarnya mobilitas *hole*. Sedangkan pada grafik kontrol, mobilitas *hole* dianggap tidak memberikan kontribusi terhadap nilai konsentrasi *hole* yang ada pada dioda Silikon, sehingga dianggap konstan. Hasil ini ditunjukkan pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 pada daerah persambungan. Hasil simulasi mengenai konsentrasi *hole* pada daerah persambungan sesuai dengan teori yang ada, bahwa semakin tinggi temperatur operasional yang ditambahkan pada dioda Silikon, maka konsentrasi *hole* yang ada pada dioda tersebut juga akan meningkat. Hal sebaliknya, jika mobilitas *hole* pada



dioda Silikon menurun, maka konsentrasi pembawa muatan (*hole*) akan meningkat (Sze, 1981). Variasi mobilitas *hole* tidak memberikan kontribusi besar terhadap nilai konsentrasi *hole* pada daerah persambungan. Hal ini ditunjukkan pada grafik (Gambar 4.9), bahwa nilai konsentrasi *hole* baik dengan mobilitas *hole* divariasikan maupun dianggap konstan tidak menunjukkan perbedaan yang besar.

Anoda merupakan daerah berikutnya yang diamati. Distribusi *hole* pada daerah anoda akibat variasi mobilitas *hole* yang merupakan fungsi dari temperatur operasional dengan mobilitas *hole* yang dianggap konstan ditunjukkan pada Gambar 4.10. Gambar 4.10 menunjukkan hubungan antara besar konsentrasi *hole* terhadap variasi temperatur operasional pada daerah anoda. Grafik berwarna merah menunjukkan data dari nilai konsentrasi *hole* ketika temperatur dan mobilitas *hole* divariasikan, sedangkan grafik warna biru menunjukkan data dari nilai konsentrasi *hole* dimana mobilitas *hole* tidak diperhitungkan. Konsentrasi *hole* berubah ketika temperatur divariasikan dari  $-50^{\circ}\text{C}$  hingga  $200^{\circ}\text{C}$  akibat adanya efek hamburan impuritas terionisasi.



Gambar 4.10 Grafik hubungan antara konsentrasi *hole* terhadap variasi temperatur di daerah anoda

Pada Gambar 4.10 tampak bahwasanya ketika temperatur yang diberikan pada dioda Silikon sebesar  $-50^{\circ}\text{C}$  konsentrasi *hole* merupakan konsentrasi tertinggi pada

daerah anoda, baik pada kondisi dimana mobilitas *hole* divariasikan ataupun dianggap konstan. Ketika temperatur operasional dinaikkan hingga 0°C dan mobilitas *hole* menurun, maka nilai konsentrasi *hole* pada temperatur tersebut menurun drastis. Penurunan konsentrasi *hole* tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.3. Namun saat mobilitas *hole* bukan merupakan fungsi dari temperatur maka distribusi *hole* pada temperatur 0°C sama dengan konsentrasi *hole* pada temperatur sebelumnya. Pada temperatur ini, nilai mobilitas *hole* tidak berpengaruh pada nilai konsentrasi *hole*. Hal ini disebabkan konsentrasi *hole* baik yang divariasikan maupun yang dianggap konstan memiliki nilai yang sama. Nilai ini dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Penurunan nilai konsentrasi *hole* terjadi ketika temperatur operasional dinaikkan hingga 50°C yang dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4. Peristiwa ini terjadi pada dioda Silikon akibat adanya hamburan impuritas terionisasi, baik mobilitas muatan divariasikan maupun dianggap konstan. Besarnya nilai konsentrasi *hole* dimana mobilitas *hole* diperhitungkan, tidak mengalami perubahan ketika temperatur dinaikkan hingga 100°C. Nilai ini ditunjukkan oleh Tabel 4.3. Saat mobilitas *hole* dianggap konstan terjadi penurunan pada konsentrasi *hole* yang dapat dilihat pada Tabel 4.4. Saat temperatur dinaikkan hingga 150°C, mobilitas *hole* tidak berkontribusi terhadap nilai konsentrasi *hole* yang ada. Hal ini ditunjukkan oleh Tabel 4.3 dan Tabel 4.4, bahwa konsentrasi *hole* memiliki besar yang sama dengan dua perlakuan yang berbeda. Untuk temperatur 200°C, nilai konsentrasi *hole* pada dioda Silikon juga mengalami penurunan ketika mobilitas *hole* menurun. Penurunan konsentrasi *hole* pada temperatur 200°C pada daerah ini ditunjukkan oleh Tabel 4.3. Namun, ketika nilai mobilitas *hole* dianggap tidak berubah terhadap kenaikan temperatur, maka konsentrasi *hole* pada kondisi ini tidak mengalami penurunan. Nilai konsentrasi *hole* pada temperatur 200°C pada daerah anoda dilihat pada Tabel 4.4. *Hole* pada daerah anoda merupakan pembawa muatan mayoritas. Pada daerah ini nilai konsentrasi *hole* sangat memberikan kontribusi yang besar kecuali pada temperatur 0°C dan 150°C. Nilai konsentrasi *hole* pada data hasil dipengaruhi oleh

dua faktor, yaitu temperatur operasional dan mobilitas *hole*. Ketika dua elemen tersebut divariasikan maka selain konsentrasi *hole*, nilai energi dan *lifetime* juga berubah. Besarnya energi yang ada pada dioda Silikon merupakan fungsi dari temperatur. Berubahnya nilai mobilitas *hole* berkontribusi terhadap nilai *lifetime* pada *hole*. Besarnya nilai *lifetime* berbanding lurus dengan jumlah mobilitas *hole* pada dioda Silikon (Seegar, 1989).

Untuk mengetahui validasi dari penelitian simulasi efek hamburan impuritas terionisasi, hal yang dilakukan sebelum melakukan penelitian dilakukan adalah observasi. Observasi yang dilakukan adalah menyelesaikan kasus yang sederhana atau kasus yang pernah sebelumnya. Kegiatan observasi dilakukan pada kasus dioda sel surya, yang telah dilakukan oleh Fitriana (2014). Pada saat observasi, dilakukan variasi parameter dioda sel surya berupa variasi panjang gelombang datang. Setelah hasil yang diperoleh dari hasil observasi sama dengan hasil penelitian sebelumnya, maka dilakukan pengembangan kasus dengan mensimulasikan dioda Silikon. Parameter yang divariasikan pun berbeda. Pada kasus ini dilakukan variasi temperatur dan mobilitas pembawa muatan untuk parameter dioda Silikon. Selain data hasil observasi, kegiatan simulasi menggunakan metode elemen hingga dapat dikatakan memiliki error yang kecil jika selama kegiatan simulasi tidak terjadi peringatan error. Walaupun tidak ada peringatan, kegiatan simulasi menggunakan metode elemen hingga masih memiliki nilai error, hanya saja masih dalam batas aman. Jika ada peringatan error, kemungkinan terjadi kesalahan pada parameter input yang dimasukkan, jumlah *mesh* yang digunakan serta batas variasi pada parameter input.

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa adanya peristiwa hamburan impuritas terionisasi menyebabkan adanya perubahan distribusi konsentrasi pembawa muatan pada dioda Silikon. Konsentrasi elektron di daerah katoda menunjukkan konsentrasi tertinggi dan semakin berkurang ketika mendekati daerah anoda. Begitu juga dengan konsentrasi *hole* di daerah anoda menunjukkan konsentrasi yang paling tinggi kemudian menurun ketika mendekati daerah katoda. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peristiwa hamburan impuritas terionisasi yang disebabkan adanya perubahan temperatur mempengaruhi konsentrasi pembawa muatan baik elektron maupun *hole*, dimana mobilitas pembawa muatan dianggap konstan maupun divariasikan. Pengamatan dilakukan di daerah sekitar katoda, anoda dan daerah persambungan.

- a. Pada daerah katoda seiring bertambahnya temperatur operasional dan menurunnya mobilitas pembawa muatan maka konsentrasi elektron meningkat dari  $1,70000 \times 10^{17} \mu m^{-2}$  menjadi  $1,70004 \times 10^{17} \mu m^{-2}$ , sedangkan konsentrasi *hole* menurun dari  $3,32273 \times 10^4 \mu m^{-2}$  menjadi  $3,32233 \times 10^4 \mu m^{-2}$ . Pada data kontrol, konsentrasi elektron meningkat dari  $1,70000 \times 10^{17} \mu m^{-2}$  hingga  $1,70004 \times 10^{17} \mu m^{-2}$ , sedangkan konsentrasi *hole* menurun dari  $3,32275 \times 10^4 \mu m^{-2}$  menjadi  $3,32234 \times 10^4 \mu m^{-2}$ .
- b. Pada daerah persambungan, konsentrasi *hole* mengalami peningkatan dari  $1,35132 \times 10^{15} \mu m^{-2}$  hingga  $1,38773 \times 10^{15} \mu m^{-2}$  dan konsentrasi elektron menurun dari  $6,80966 \times 10^7 \mu m^{-2}$  menjadi  $6,43507 \times 10^7 \mu m^{-2}$ . Pada data kontrol, konsentrasi *hole* meningkat dari  $1,35187 \times 10^{15} \mu m^{-2}$  hingga  $1,38726 \times 10^{15} \mu m^{-2}$ , sedangkan konsentrasi elektron menurun dari  $6,80035 \times 10^7 \mu m^{-2}$  menjadi  $6,45013 \times 10^7 \mu m^{-2}$ .

- c. Pada daerah anoda konsentrasi *hole* menurun dari  $1,69966 \times 10^{17} \mu m^{-2}$  hingga  $1,69850 \times 10^{17} \mu m^{-2}$  akibat adanya perubahan mobilitas *hole*, konsentrasi *hole* juga menurun dari  $1,69864 \times 10^{17} \mu m^{-2}$  menjadi  $1,69851 \times 10^{17} \mu m^{-2}$  ketika mobilitas *hole* dianggap konstan. Konsentrasi elektron pada daerah anoda akibat adanya variasi mobilitas elektron meningkat kecuali pada temperatur 100°C dan 150°C, sedangkan konsentrasi elektron pada daerah anoda dimana mobilitas elektron konstan meningkat kecuali pada temperatur 150°C dan 200°C.

## 5.2 Saran

Ada beberapa masukan yang direkombinasikan oleh peneliti untuk penelitian lebih lanjut, yaitu:

1. Pada penelitian ini hanya memvariasi temperatur operasional dan mobilitas pembawa muatan, sehingga pada penelitian selanjutnya dapat divariasikan konsentrasi dopan dan variabel lain yang berkaitan dengan parameter dioda Silikon.
2. Penelitian ini hanya mengkaji pemodelan distribusi pembawa muatan dan grafik hubungan antara temperatur operasional terhadap distribusi pembawa muatan. Untuk menyempurnakan kajian terhadap karakteristik dioda Silikon, dapat dilanjutkan penelitian yang berkaitan dengan karakteristik I-V.
3. Pada penelitian ini hanya menampilkan profil distribusi pembawa muatan dalam model 2 Dimensi saja, sehingga dapat dikembangkan dalam bentuk 3 Dimensi.

**DAFTAR PUSTAKA**

**Buku**

- Boylestad, R & Nashelsky, L. 2009. *Electronic Devices and circuit Theory*. New Jersey: Prentice Hall.
- Cardona, M, Yu, P.Y. 2001. *Fundamentals of Semiconductors*. New York: Springer.
- Colinge, J.P. 2002. *Physics of Semiconductor Devices*. New York: Kluwer academic Publisher.
- Danielsson, E. 2000, *FEMLAB Model Library for Semiconductor Device Model*, Stockholm: The Royal Institute of Institute.
- Fukuda, M. 1999. *Optical Semiconductor Devices*. Canada: John Willey & Sons, Inc.
- Gareso, P.L. 2012. *Fisika Semikonduktor*. Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Geotzberger, A., Knobloch, J., Voß, B. *Crystalline Silicon Cells*. Terjemahan oleh Rachel Waddington. 1998. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Kittel, C. 1976. *Introduction to Solid State Physics*. USA. John Wiley & Sons.
- Malvino, A.P. 1979. *Electronic Prinsiples*. New York: McGraw-Hill.
- Polycarpou, A.C. 2006. *Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics*. USA: Morgan & Claypool Publishers.
- Puri, R.K & Babbar. 2001. *Solid State Physics & electronics*. New Delhi: S. Chand & Company LTD.

- Rio, R.S. 1999. *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*. Jakarta: PT. Pradya Paramita.
- Seegar, K. 1989. *Semiconductor Physics An Introduction*. New York: Springer.
- Setiawan, Rusdiana, Hamidah dan Kaniawati. 2007. *Modul Semikonduktor*. Bandung: FMIPA UPI.
- Subekti, A. 2003. *Elektronika Dasar*. Jember: Fakultas MIPA Universitas Jember .
- Subekti, A. 2003. *Semikonduktor*. Jember: Fakultas MIPA Universitas Jember .
- Sutrisno, 1986. *Elektronika: Teori dan Penerapannya jilid 1*. Bandung: ITB.
- Sze, S.M. 1981. *Physics Of Semiconductor Devices*. New York. John Willey & Son.

#### **Skripsi/Tesis/Disertasi**

- Aslizar. 1996. *Pengaruh Suhu Terhadap Karakteristik volt-Ampere Persambungan p-n Silikon pada Bias Maju*. Semarang: UNDIP.
- Kurniawan, H. 2013. *Analisis Pengaruh Temperatur Operasional dalam Simulasi Karakteristik Arus-tegangan pada Dioda Si Menggunakan Femab*. Jember: Universitas Jember.
- Usman, I. 2006. *Penumbuhan Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi dengan Teknik HWC-VHF-PECVD dan Aplikasinya pada Sel Surya*. Bandung: ITB.
- Fitriana, 2014. *Simulasi Pengaruh Panjang Gelombang Foton Datang Terhadap Karakteristik I-V Dioda Sel Surya Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Jember: Universitas Jember.

#### **Jurnal**

- Rusdiana, D. 2010. *Mekanisme Hamburan Defek Statis dan Vibrasi Termal Terhadap Mobilitas Elektron pada Film Tipis GaN*. Berkala Fisika ISSN 141-09662. Vol **13** (1): 39-44.

R. Karthik, P. Uma Sathyakam, P. S. Mallick. 2011. *Effect of Dislocation Scattering on Electron Mobility in GaN*. Natural Science 812-815.Vol 3 (9).

### Internet

Handayanu. 2012. *Metode Elemen Hingga*. Surabaya: ITS [serial online]. <http://personal.its.ac.id/files/material/2983-handayanu-oe-01.METODE%20ELEMEN%20HINGGA%20pengantar1.pdf> [24 Januari 2015].

Parno, 2002. *Pendahuluan Fisika Zat Padat*. Malang: FMIPA Universitas Negeri Malang [Serial Online]. [http://elhanif.staff.fkip.uns.ac.id/files/2012/11/8.KRISTAL\\_SEMIKONDUKTOR.pdf](http://elhanif.staff.fkip.uns.ac.id/files/2012/11/8.KRISTAL_SEMIKONDUKTOR.pdf) [24 Januari 2015].

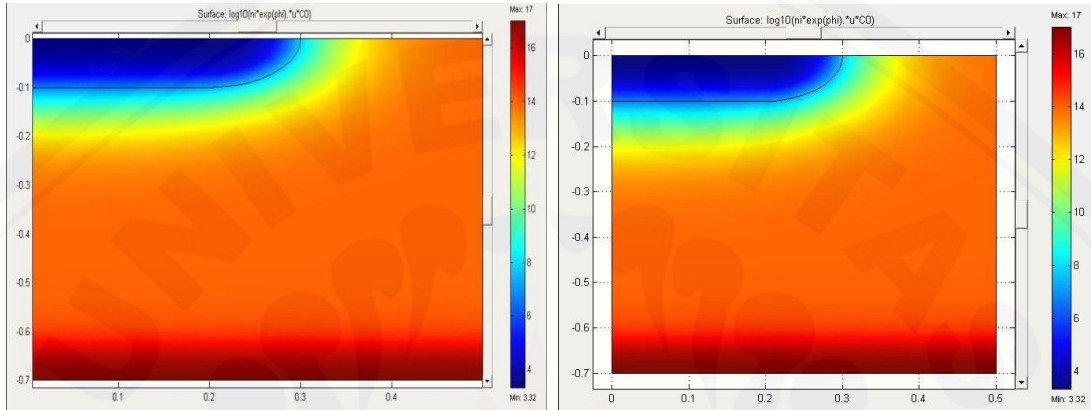
Rahardjo, A. 2008. *Optimasi Pemanfaatan Sel Surya pada Bangunan Komersial Secara Terintegrasi sebagai bangunan hemat Energi*. Jakarta: Universitas Indonesia [serial online]. <http://www.scribd.com/doc/147027122/Potensi-Energi-Matahari#scribd> [27 Januari 2015].

Tewksbury. 2005. [serial online]. <http://www.academia.edu/8606839/Silikon> [27 April 2015].



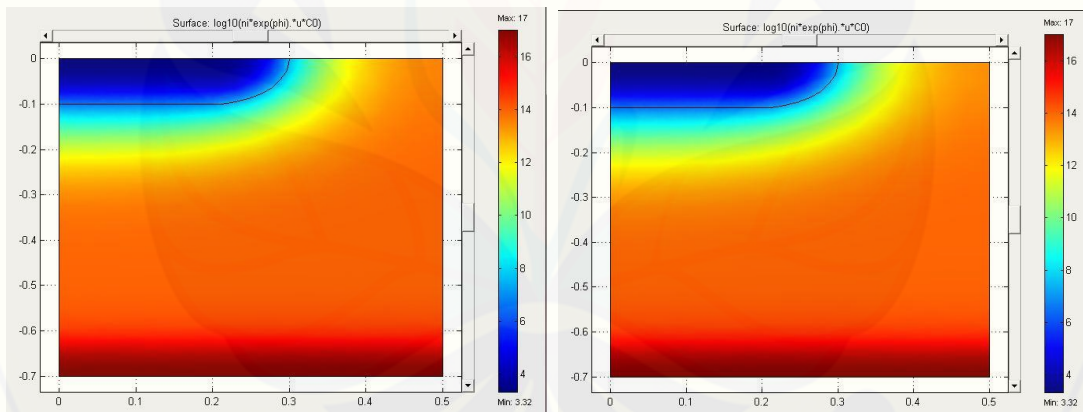
## LAMPIRAN A. PROFIL DISTRIBUSI KONSENTRASI ELEKTRON PADA VARIASI TEMPERATUR

### A.1 Profil Distribusi Konsentrasi Elektron Akibat Hamburan Impuritas Terionisasi dengan Variasi Temperatur dan Mobilitas Elektron



(a)

(b)



(c)

(d)

Catatan:

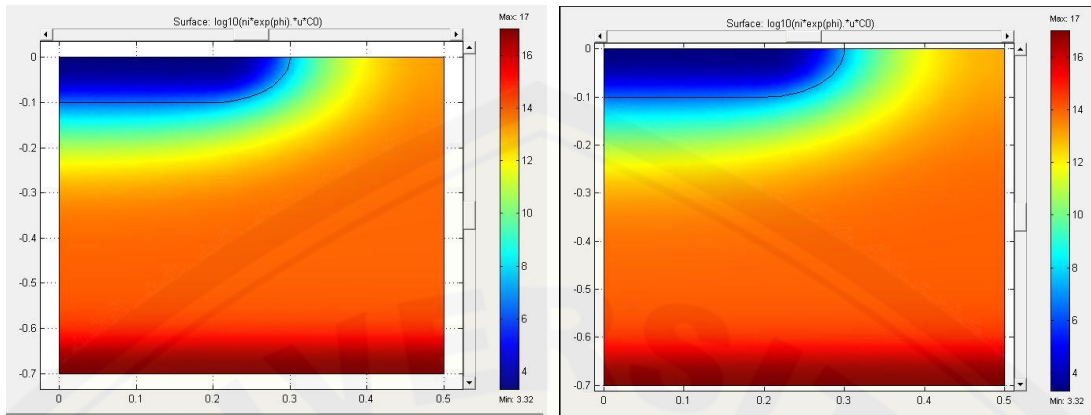
Profil distribusi konsentrasi elektron:

(a)  $T = -50^{\circ}\text{C}$ ;

(b)  $T = 0^{\circ}\text{C}$ ;

(c)  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;

(d)  $T = 100^{\circ}\text{C}$ ;



(a)

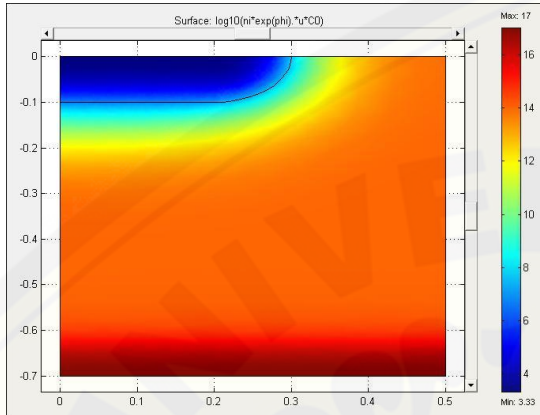
(b)

Catatan:

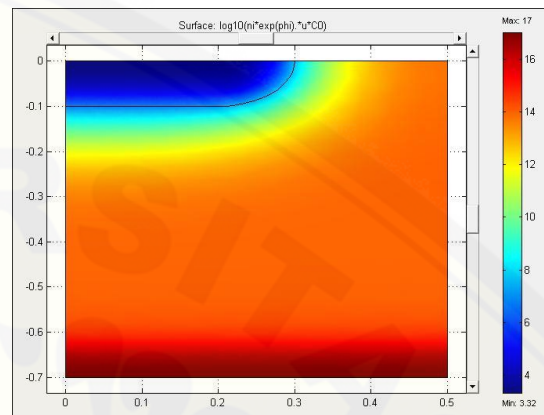
Profil distribusi konsentrasi elektron:

(a)  $T = 150^{\circ}\text{C}$ ;      (b)  $T = 200^{\circ}\text{C}$ ;

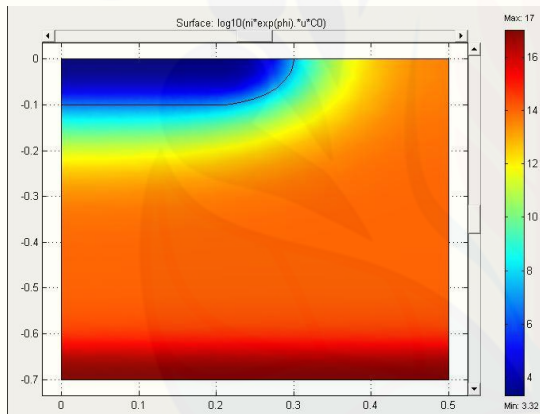
A.2 Profil Distribusi Konsentrasi Elektron Akibat Adanya Hamburan Impuritas Terionisasi dengan Variasi Temperatur dimana Mobilitas Elektron Konstan



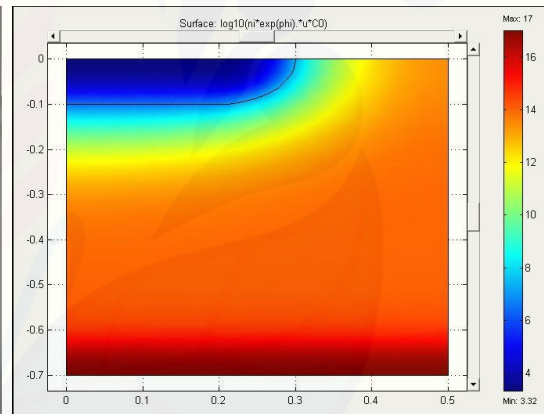
(a)



(b)



(c)



(d)

Catatan:

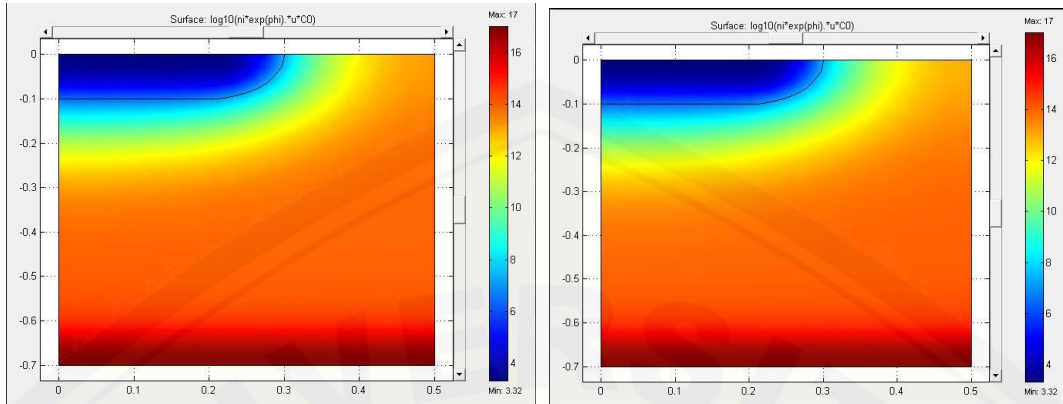
Profil distribusi konsentrasi elektron:

(a)  $T = -50^{\circ}\text{C}$ ;

(b)  $T = 0^{\circ}\text{C}$ ;

(c)  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;

(d)  $T = 100^{\circ}\text{C}$ ;



(a)

(b)

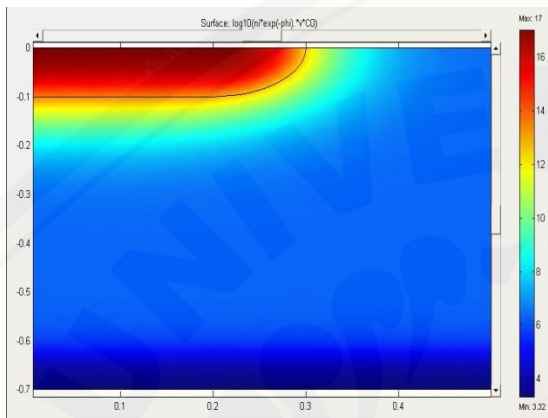
Catatan:

Profil distribusi konsentrasi elektron:

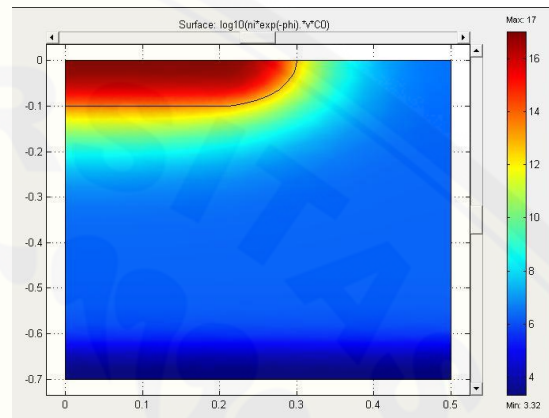
(a)  $T = 150^{\circ}\text{C}$ ;      (b)  $T = 200^{\circ}\text{C}$ ;

**LAMPIRAN B. PROFIL DISTRIBUSI KONSENTRASI *HOLE* PADA VARIASI TEMPERATUR**

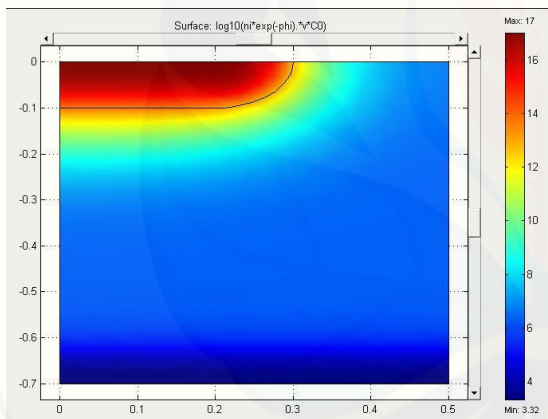
**B.1 Profil Distribusi Konsentrasi *Hole* Akibat Hamburan Impuritas Terionisasi dengan Variasi Temperatur dan Mobilitas *Hole***



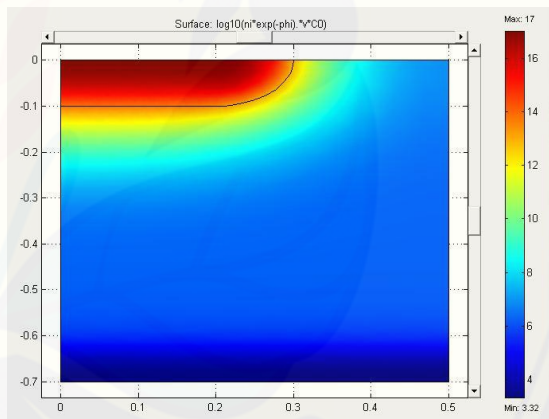
(a)



(b)



(c)



(d)

Catatan:

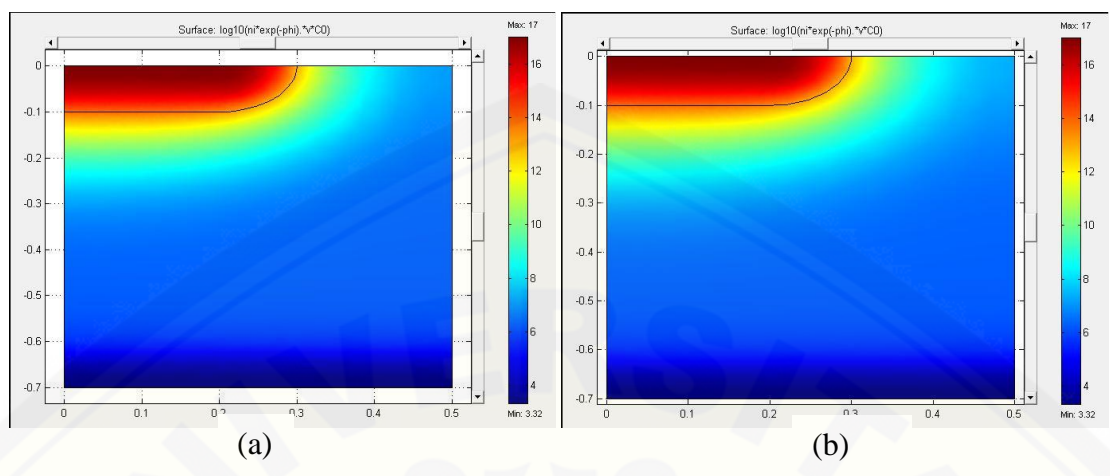
Profil distribusi konsentrasi *hole*:

(a)  $T = -50^{\circ}\text{C}$ ;

(b)  $T = 0^{\circ}\text{C}$ ;

(c)  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;

(d)  $T = 100^{\circ}\text{C}$ ;

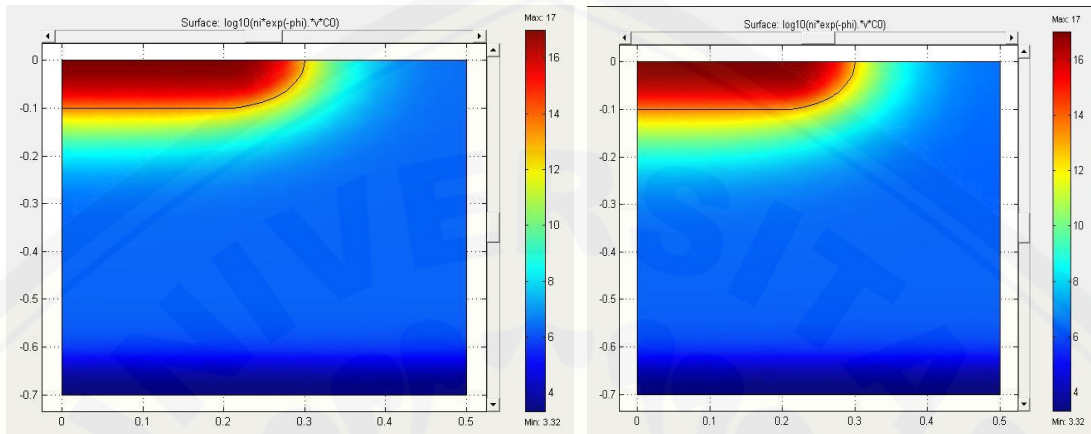


Catatan:

Profil distribusi konsentrasi *hole*:

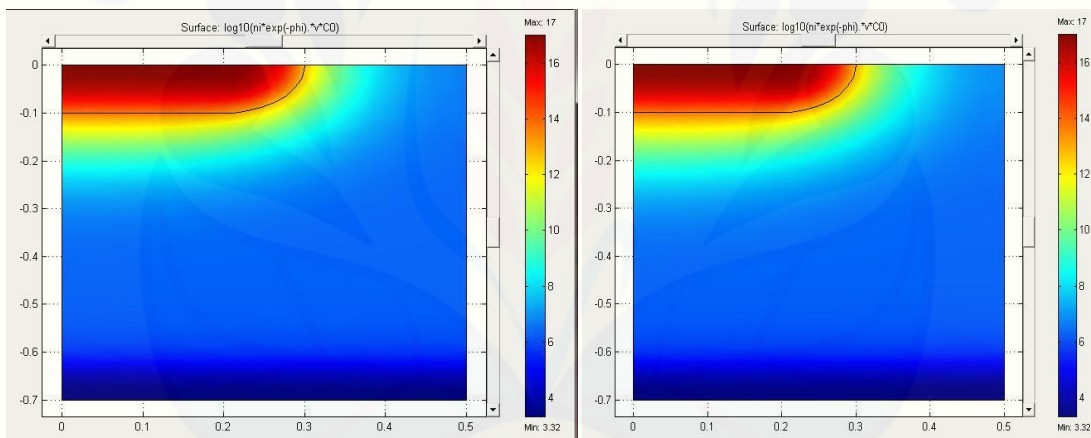
(a)  $T = 150^{\circ}\text{C}$ ;      (b)  $T = 200^{\circ}\text{C}$ ;

B.2 Profil Distribusi Konsentrasi *Hole* Akibat Adanya Hamburan Impuritas Terionisasi dengan Variasi Temperatur dimana Mobilitas *Hole* Konstan



(a)

(b)



(c)

(d)

Catatan:

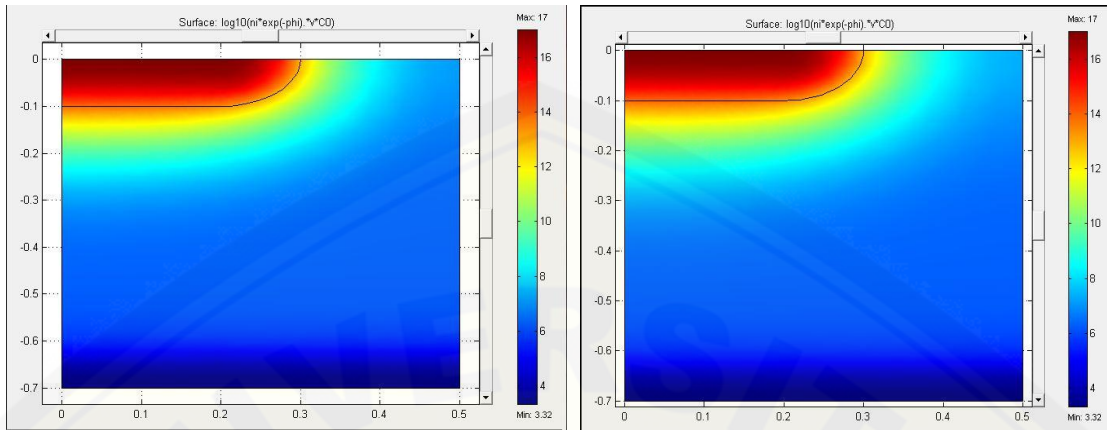
Profil distribusi konsentrasi *hole*:

(a)  $T = -50^{\circ}\text{C}$ ;

(b)  $T = 0^{\circ}\text{C}$ ;

(c)  $T = 50^{\circ}\text{C}$ ;

(d)  $T = 100^{\circ}\text{C}$ ;



(a)

(b)

Catatan:

Profil distribusi konsentrasi *hole*:

(a)  $T = 150^{\circ}\text{C}$ ;      (b)  $T = 200^{\circ}\text{C}$ ;

