



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISA COULOMB OSCILLATION DENGAN TEGANGAN  
BIAS DEKAT COULOMB BLOCKADE PADA SINGLE  
ELEKTRON TRANSISTOR**

**SKRIPSI**

**VINCENTIUS RYAN C  
0806455490**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISA COULOMB OSCILLATION DENGAN TEGANGAN  
BIAS DEKAT COULOMB BLOCKADE PADA SINGLE  
ELEKTRON TRANSISTOR**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana**

**VINCENTIUS RYAN C  
0806455490**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Vincentius Ryan C**

**NPM : 0806455490**

**Tanda Tangan :** 

**Tanggal : 8 Juni 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Vincentius Ryan C  
NPM : 0806455490  
Program Studi : S1  
Judul Skripsi : Analisa Coulomb Oscillation dengan  
Tegangan Bias Dekat Coulomb Blockade  
pada Single Elektron Transistor

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik, pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto M.Sc.

Penguji 1 : Ir. Purnomo Sidi Priambodo M.Sc, Ph.D.

Penguji 2 : Dr. Ratno Nuryadi

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 26 Juni 2012

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan syukur dan terima kasih kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan bimbingan-Nya, Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini adalah salah kewajiban yang harus diselesaikan sebelum mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Tanpa bantuan maupun dukungan dari pihak-pihak tertentu, Penulis tidak dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya.

1. Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto M.Sc. Selaku pembimbing yang telah menentukan dan menyetujui judul skripsi ini, bersedia meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan petunjuk dan saran dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Albertus Bramantyo. Selaku senior yang telah membantu menjelaskan salah satu teori dari skripsi ini.
3. Keluarga penulis. Selaku pendorong dan pengingat untuk menyelesaikan skripsi ini.

Penulis mohon maaf bila terdapat kesalahan atau kekurangan pada laporan ini. Penulis juga berterima kasih atas perhatian yang diberikan oleh orang yang membaca laporan ini.

Depok, 8 Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Vincentius Ryan C  
NPM : 0806455490  
Program Studi : S1 Reguler  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty -Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Analisa Coulomb Oscillation dengan Tegangan Bias Dekat Coulomb Blockade pada Single Elektron Transistor**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : 8 Juni 2012

Yang menyatakan

  
(Vincentius Ryan C)

## ABSTRAK

Nama : Vincentius Ryan C  
Program Studi : Teknik/Elektro  
Judul : Analisa Coulomb Oscillation dengan Tegangan Bias Dekat  
Coulomb Blockade pada Single Elektron Transistor

Perkembangan teknologi dalam bidang nanoteknologi sangatlah berkembang pesat. *Single electron transistor (SET)* adalah salah satu aplikasinya. SET beroperasi menggunakan prinsip *coulomb blockade*. *Coulomb blockade* muncul pada tegangan source-drain yang sangat rendah. *Coulomb blockade* dapat dihilangkan dengan mengubah tegangan gate dari dalam ke luar *coulomb blockade*. Di luar *coulomb blockade*, arus dapat mengalir antara *source* dan *drain*. Pada tegangan *source-drain* ( $V_{ds}$ ) yang diberikan, arus SET dapat dimodulasikan dengan tegangan gate ( $V_g$ ). Dengan menggeser tegangan gate, arus dapat berosilasi antara nol (*coulomb blockade*) dan tidak nol (*no coulomb blockade*). Osilasi ini dikenal dengan *coulomb oscillation*. Dalam skripsi ini, analisa *coulomb oscillation* dari *single electron transistor (SET)* disimulasikan dengan menggunakan perbandingan 2 tegangan bias. Yang pertama adalah tegangan bias yang melewati *coulomb blockade* dan yang kedua adalah tegangan bias yang tidak melewati *coulomb blockade*. Struktur divais SET yang digunakan adalah struktur *double barrier tunnel junction (DBJT)*. Simulasi menggunakan Matlab R2009a. Salah satu hasil yang diperoleh dari simulasi yang dilakukan ini adalah dihasilkan puncak gunung sebesar 61.35 pA yang menggantikan lembah pada *coulomb oscillation* ketika menggunakan tegangan bias 0.0197 volt. Bentuk puncak gunung pada *coulomb oscillation* ini ditentukan oleh perbandingan tinggi dari *diamonds* yang dilewati oleh tegangan bias yang dibentuk dari diagram stabilitas. Tinggi *diamonds* pada diagram stabilitas ini ditentukan oleh besar kapasitansi, *background charge*, dan tegangan gate.

Kata kunci :  
analisa *coulomb oscillation*, *single-electron transistor (SET)*, *coulomb blockade*

## ABSTRACT

Name : Vincentius Ryan C  
Study Program: Teknik/Elektro  
Title : Analysis Coulomb Oscillation Using Bias Voltage Near Coulomb Blockade in Single Electron Transistor

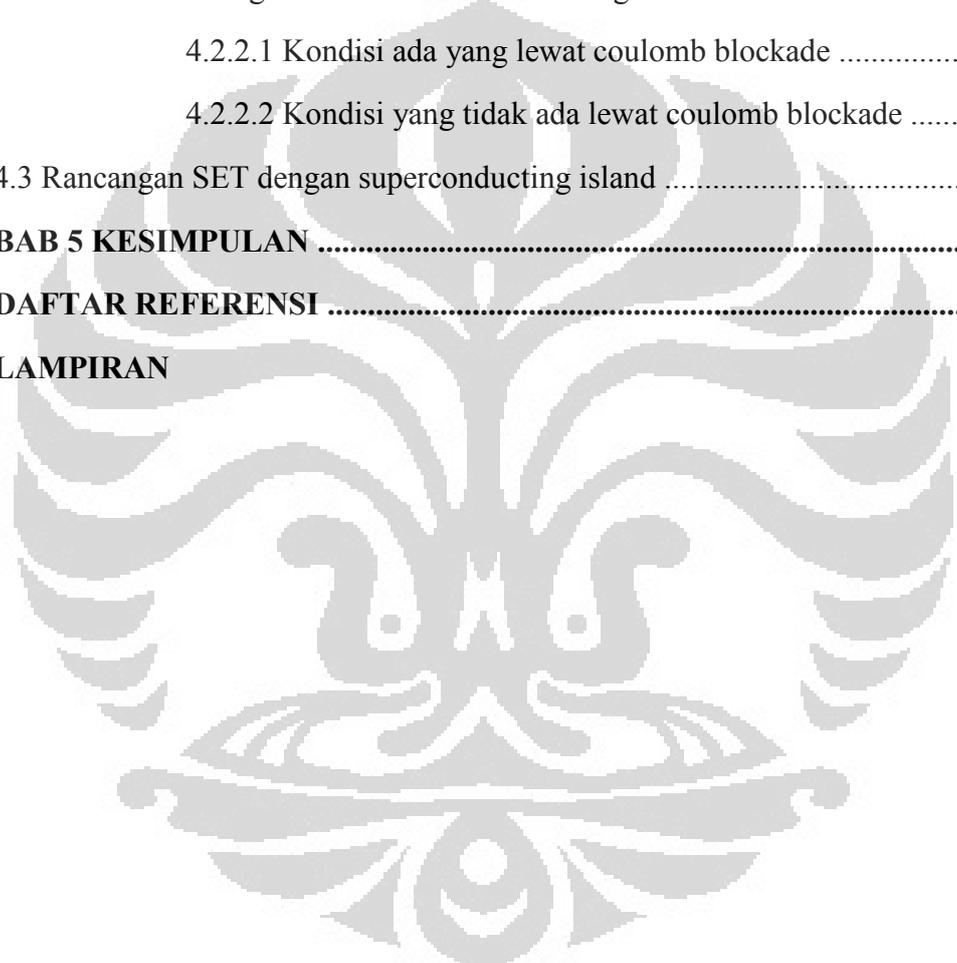
Technology development in the field of nanotechnology is growing rapidly. Single Electron Transistors (SET) is one of the application. SET operates using principle of coulomb blockade. Coulomb blockade appears at very low source-drain voltage. The Coulomb blockade can be removed by the changing of gate voltage from inside Coulomb blockade to the outside. Outside the Coulomb blockade, a current can flow the between the source and drain. At a given source-drain voltage  $V$ , the SET current can be modulated by gate voltage  $V_g$ . By sweeping the gate voltage, the currents oscillate between zero (Coulomb blockade) and non-zero (no Coulomb blockade). This oscillation is known by coulomb oscillation. In this script, analysis of coulomb oscillation of single electron transistor (SET) simulated by using comparison of two bias voltage. First is bias voltage passing through the coulomb blockade and second is bias voltage that does not pass through coulomb blockade. Structure of the SET device used is the structure of double barrier tunnel junction (DBJT). Simulation uses Matlab R2009a. One of the results obtained from a this simulation is produced a mountain peak of 61.35 pA that replaces the valley on coulomb oscillation when using bias voltage 0.0197 volts. The form of the peak mountain on coulomb oscillation is determined by the ratio of the height of the diamonds that are bypassed by bias voltage which is formed of the stability diagram. Height of the diamonds on stability diagram determined by large capacitance, background charge, and gate voltage.

Keywords :  
analysis coulomb oscillation, single-electron transistor (SET), coulomb blockade

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Riset .....	3
1.4 Manfaat Riset .....	3
1.5 Batasan Riset .....	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Single Electron .....	5
2.2 SET dan Fenomena di dalamnya .....	6
2.3 SET dengan superconducting island .....	11
<b>BAB 3 RANCANGAN SIMULASI .....</b>	<b>14</b>
3.1 Rancangan diagram stabilitas .....	14
3.2 Rancangan coulomb oscillation .....	16
3.2.1 Bentuk coulomb oscillation .....	16
3.2.2 Hubungan coulomb oscillation dengan suhu .....	17
3.3 Rancangan SET dengan superconducting island .....	18

<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>19</b>
4.1 Rancangan diagram stabilitas .....	19
4.2 Rancangan coulomb oscillation .....	21
4.2.1 Bentuk coulomb oscillation .....	22
4.2.1.1 Kondisi ada yang lewat coulomb blockade .....	22
4.2.1.2 Kondisi yang tidak ada lewat coulomb blockade .....	22
4.2.2 Hubungan coulomb oscillation dengan suhu .....	30
4.2.2.1 Kondisi ada yang lewat coulomb blockade .....	31
4.2.2.2 Kondisi yang tidak ada lewat coulomb blockade .....	31
4.3 Rancangan SET dengan superconducting island .....	33
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>36</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>38</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

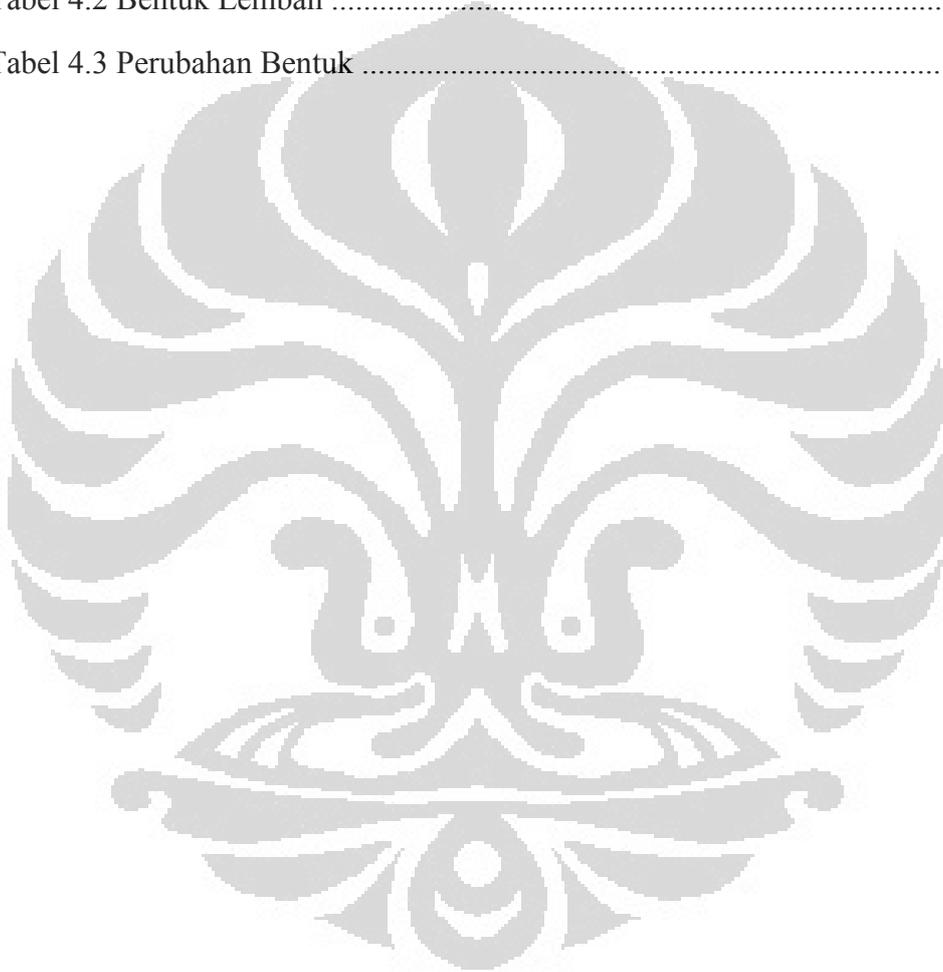


## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) <i>Geometry of SET</i> , (b) <i>Equivalent circuit of SET of tunnel and non-tunnel junctions with ideal voltage source</i> , (c) <i>SET with double island</i> .....	7
Gambar 2.2 Schematic band diagram of the single-electron transistor.....	7
Gambar 2.3 Single electron transistor mempunyai struktur dot di tengah yang diapit oleh dua tunnel capacitor dan satu gate capacitor. Source dihubungkan ke ground dengan drain dan gate masing-masing diberi tegangan $V$ dan $V_G$ .....	9
Gambar 4.1 Diagram Stabilitas untuk $c_s=1e-20$ , $c_d=1e-17$ , $c_g=10e-18$ .....	20
Gambar 4.2 Diagram Stabilitas untuk $c_s=1e-18$ , $c_d=1e-18$ , $c_g=1e-18$ .....	20
Gambar 4.3 Coulomb Oscillation dengan $V_{ds}$ yang berbeda .....	21
Gambar 4.4 Coulomb Oscillation untuk $V_{ds} = 0.005$ V .....	23
Gambar 4.5 Coulomb Oscillation untuk $V_{ds}= 0.01$ V.....	23
Gambar 4.6 Coulomb Oscillation untuk $V_{ds}= 0.003$ V.....	24
Gambar 4.7 Coulomb Oscillation untuk $V_{ds}= 0.015$ V.....	25
Gambar 4.8 Coulomb Oscillation untuk $V_{ds}= 0.0197$ V.....	25
Gambar 4.9 Perbandingan tinggi <i>diamond</i> yang dilewati oleh $V_{ds}$ sebesar 0.01 V .....	26
Gambar 4.10 Perbandingan tinggi <i>diamond</i> yang dilewati oleh $V_{ds}$ sebesar 0.015 V .....	27
Gambar 4.11 Perbandingan tinggi <i>diamond</i> yang dilewati oleh $V_{ds}$ sebesar 0.02 V .....	28
Gambar 4.12 Hubungan $I_{ds}$ dengan Suhu .....	31
Gambar 4.13 Coulomb Oscillation untuk $V_{ds} = 0.005$ V dengan 4 suhu yang berbeda .....	32
Gambar 4.14 Coulomb Oscillation untuk $V_{ds} = 0.01$ V dengan 4 suhu yang berbeda .....	32
Gambar 4.15 System Free Energy at $V_{ds} = 0$ V .....	33
Gambar 4.16 Coulomb Oscillation $2e$ periodic .....	34
Gambar 4.17 $I-Q_0$ with low temperature $2e$ periodic, high temperature $e$ periodic .....	35

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Nilai Variabel SET A .....	14
Tabel 3.2 Nilai Variabel SET B .....	15
Tabel 3.3 Nilai Variabel SET <i>superconducting island</i> .....	18
Tabel 4.1 Kombinasi tinggi <i>diamond</i> .....	29
Tabel 4.2 Bentuk Lembah .....	29
Tabel 4.3 Perubahan Bentuk .....	30



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Algoritma Matlab Diagram Stabilitas .....	39
Lampiran 2	Algoritma Matlab Coulomb Oscillation.....	40
Lampiran 3	Algoritma Matlab SET Superconducting Island.....	41



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan jaman, maka banyak penemuan-penemuan yang sangat menakjubkan. Transistor semikonduktor merupakan salah satu penemuan yang paling luar biasa sepanjang masa. Transistor semikonduktor ini telah menjadi bagian atau komponen utama dari semua peralatan elektronik modern. Seiring berjalannya waktu, perkembangan ini tidak hanya untuk aplikasi melainkan juga pengembangan dalam bidang ukuran divais. Pengembangan itu membuahkan hasil dan hasilnya saat ini yaitu sebuah teknologi fabrikasi modern yang memungkinkan kita untuk melakukan berbagai teknik fabrikasi divais bukan dalam skala mikro melainkan ke dalam skala yang lebih kecil lagi dari mikro yaitu ukuran nano.

Salah satu aplikasi dari transistor semikonduktor yaitu MOSFET. Dalam pengembangan ukuran MOSFET ini ternyata ketika panjang channelnya di bawah 20 nanometer, MOSFET tersebut tidak dapat beroperasi dengan baik akibat adanya *downscaling* yang menyebabkan terjadinya sebuah fluktuasi statistik yang sangat besar dari tegangan ambang batasnya. Oleh karena itulah diperlukan suatu pendekatan untuk mengatasi hal itu. Berbagai pendekatan telah dilakukan tetapi tidak semuanya berhasil. Akhirnya ditemukan sebuah pendekatan yang dipelopori oleh Kulik dan Shekhter atau lebih dikenal dengan *orthodox theory*. Teori yang dipelopori oleh kedua orang tersebut ternyata bisa mengatasi masalah tersebut. teori itu memanfaatkan fenomena yang terjadi yaitu fenomena single electron.

Kemudian setelah kemunculan teori ini maka pengembangan divais *single electron* yang memanfaatkan fenomena unik tersebut yaitu fenomena *tunneling single electron*. Divais *single electron* ini ternyata memiliki keuntungan yang cukup handal seperti konsumsi daya rendah dan ukuran kecil. Hal menarik lain yang terjadi yaitu ternyata di dalam fenomena tersebut terdapat *coulomb blockade* atau *single electron charging effect* yang memungkinkan kita untuk mengontrol dengan tepat sejumlah kecil elektron. Ketika dicoba ke dalam aplikasi ternyata

pengurangan jumlah elektron dalam transisi *switching* membuat daya yang hilang dari rangkaian bisa berkurang dan juga meningkatkan kemungkinan dari integrasi rangkaian ke level yang lebih tinggi lagi.

Sejak ditemukan divais single elektron banyak peneliti yang berlomba-lomba untuk mengembangkan aplikasinya. Salah satunya yaitu single elektron transistor (SET). Kemampuan yang paling menonjol dari SET yaitu kemungkinan untuk beralih dari kondisi isolasi ke konduksi dengan menambahkan satu buah elektron ke elektrode gerbang. Hal ini berbeda dengan MOSFET yang pada umumnya memerlukan elektron yang cukup banyak.

Komponen dasar dari SET yaitu sebuah sistem *double junction*. Ketika SET diberikan tegangan sangat kecil ternyata SET bekerja secara bergantian menyala dan mati. Hal ini disebabkan karena SET ada yang melewati kondisi *coulomb blockade* dan ada yang tidak. Ketika SET melewati *coulomb blockade* maka tidak ada arus yang mengalir sedangkan ketika tidak melewati maka ada arus yang mengalir. Tetapi ketika SET diberikan tegangan yang besar ternyata SET bekerja terus menerus karena melewati batas *coulomb blockade* sehingga ada arus yang mengalir. SET juga bisa dikontrol dengan mengatur kapasitansi gatenya.

Hasil dari kondisi SET ada yang melewati maupun tidak ada yang melewati *coulomb blockade* membentuk suatu bentuk tertentu dengan periode tertentu. Bentuk ini dikenal dengan *coulomb oscillation*. *Coulomb oscillation* ini dipakai untuk menentukan apakah divais SET bekerja berdasarkan fenomena *single electron* atau tidak.

Kita tidak bisa secara mudah mengetahui berapa besar *coulomb blockade*, bentuk *coulomb oscillation*, apakah SET bekerja atau tidak jika diberikan kapasitansi atau tegangan tertentu. Untuk mengetahuinya harus digunakan perhitungan yang cukup rumit. Oleh karena itu diperlukan sebuah simulasi untuk

memudahkan kita untuk mempelajari dan mengetahui fenomena dan karakteristik dari SET tersebut.

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun permasalahan yang terdapat dalam proses simulasi tertulis di bawah ini.

- a. Kondisi simulasi berada di Coulomb Blockade atau tidak  
Sebelum melakukan simulasi untuk Coulomb Oscillation, maka kita harus menentukan besar bias voltage yang berada pada Coulomb blockade dan yang tidak.
- b. Terbatasnya hasil simulasi untuk SET dengan superconducting island  
Karena terbatasnya informasi parameter SET dengan superconducting island dari referensi-referensi yang ada, maka sebagian hasil simulasinya menggunakan referensi yang ada.

## 1.3 Tujuan Riset

Sebagai mahasiswa Teknik Elektro, Penulis ingin mengetahui dan memahami lebih banyak tentang divais SET. Tujuan dari laporan ini adalah:

- a) dapat mensimulasikan operasi divais SET;
- b) dapat membuktikan fenomena-fenomena yang terjadi pada divais SET;
- c) dapat menganalisa perbedaan operasi divais SET yang menggunakan *island* biasa dengan *superconducting island*.

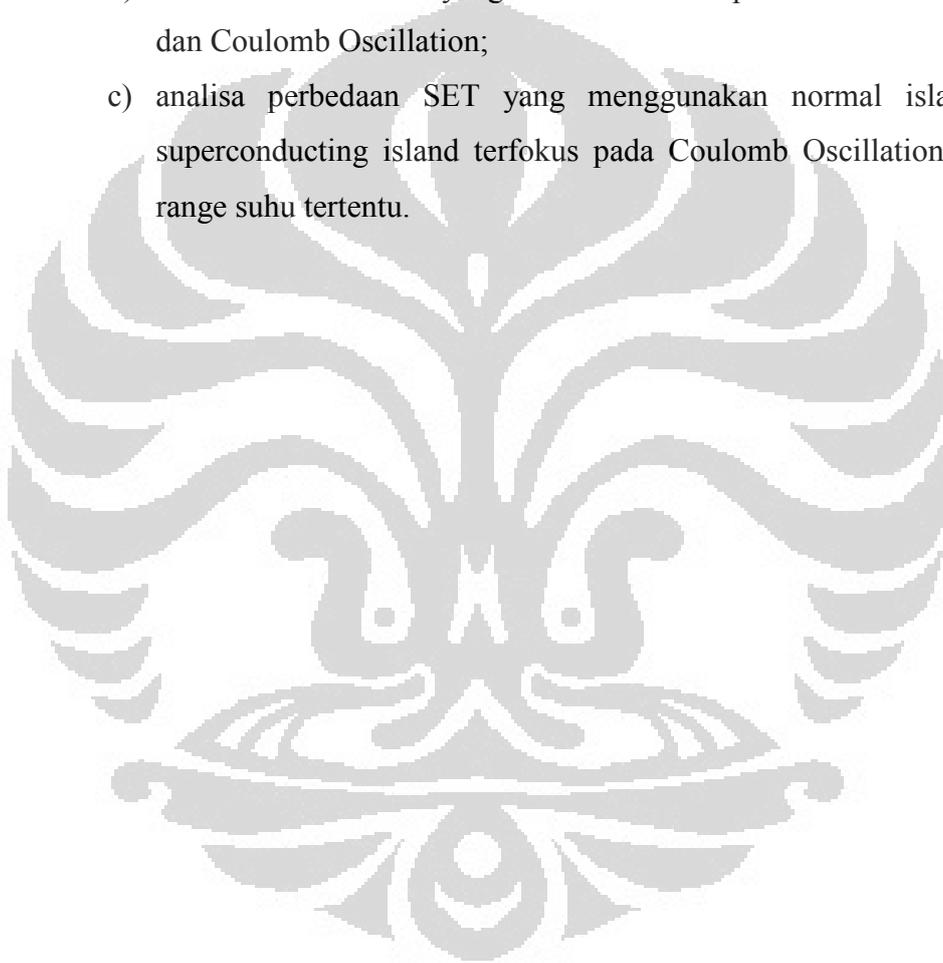
## 1.4 Manfaat Riset

Manfaat dari riset ini adalah dapat digunakan sebagai bahan untuk mengaplikasikan divais SET untuk beberapa kegunaan.

## 1.5 Batasan Riset

Pada laporan ini, Penulis akan membatasi beberapa hal untuk mengurangi kerumitan masalah dan pembahasan yang luas. Lingkup permasalahan yang akan dibahas pada laporan ini adalah:

- a) pembahasan ilmu nanoteknologi mengenai divais *Single Electron Transistor (SET)*;
- b) fenomena divais SET yang dibahas terfokus pada Coulomb Blockade dan Coulomb Oscillation;
- c) analisa perbedaan SET yang menggunakan normal island dan superconducting island terfokus pada Coulomb Oscillation dengan range suhu tertentu.



## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Single Electron

Elektron adalah sebuah partikel subatom yang bermuatan negatif. Elektron dilambangkan dengan  $e$ . Massa elektron yaitu  $1/1836$  masa proton. Elektron mempunyai muatan listrik sebesar  $1,602 \times 10^{-19}$  coulumb [1]. Elektron dapat mempunyai sifat dualitas yaitu bisa berupa partikel atau gelombang. *Single electron* merupakan teknologi yang memanfaatkan pergerakan satu buah elektron. *Single electron* ini memiliki sebuah teori pendukung yang cukup lama. Teori pendukung ini dikenal dengan nama *orthodox theory*. *Orthodox theory* ini dipelopori oleh Kulik dan Shekhter dan memiliki 3 asumsi utama seperti di bawah ini [2].

1. Kuantisasi energi elektron dalam konduktor diabaikan sehingga spektrum energi elektron diperlakukan kontinu. Tetapi asumsi ini hanya berlaku jika  $E_k \ll k_b T$ .
2. Waktu dari tunel elektron menembus barrier diasumsikan sangat kecil dibandingkan dengan skala waktu lainnya. Asumsi ini hanya berlaku untuk tunel barrier yang digunakan pada praktikal divais single elektron dimana  $t_t \sim 10^{-15} s$ .
3. *Cotunneling* diabaikan. Asumsi ini hanya berlaku jika resistansi  $R$  dari semua tunel barrier dari sistem lebih tinggi dari resistansi unit kuantum  $R_Q$ .

$$R \gg R_Q, \quad R_Q = h/4e^2 \approx 6.5 \text{ k}\Omega$$

Ada beberapa efek penting yang terjadi pada sistem non-superconducting yang tidak dihitung pada *orthodox theory* seperti di bawah ini [2].

### 1. *Cotunneling*

Efek ini menunjukkan bahwa terdapat beberapa elektron yang melewati barrier yang berbeda pada waktu yang bersamaan dari satu proses mekanik kuantum.

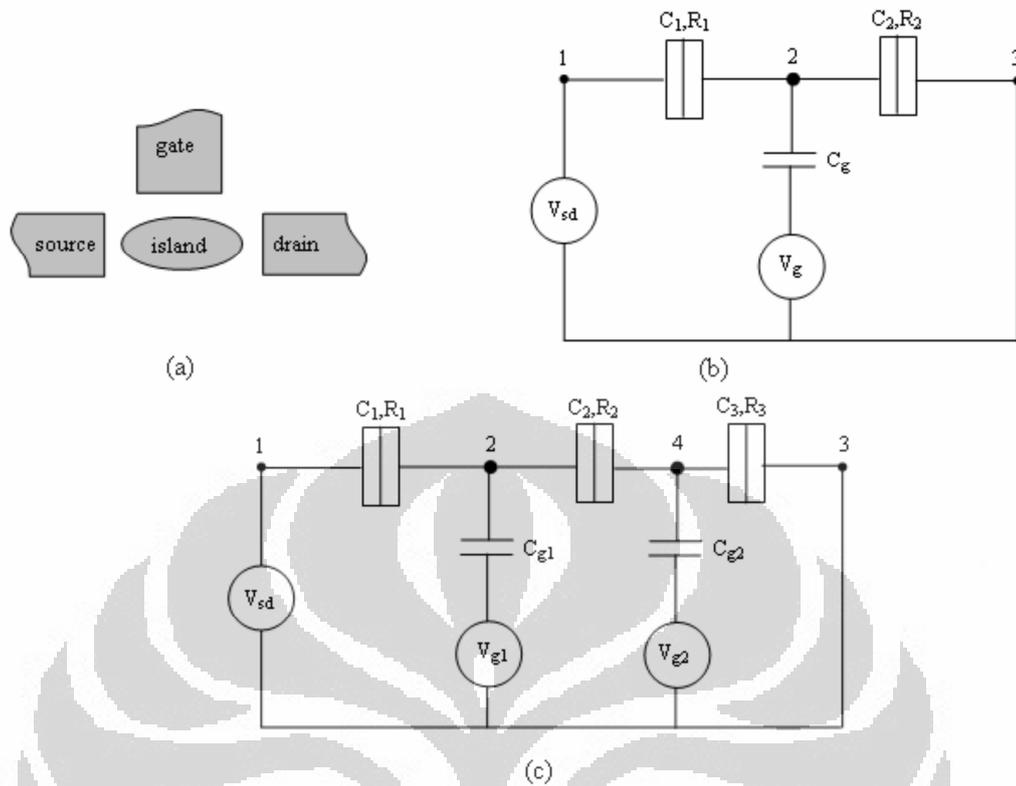
### 2. *Discrete Energy Level*

Untuk island yang sangat kecil, kuantum yang memisahkan  $E_k$  antara level energi elektron menjadi lebih besar dari  $E_c$  dan  $k_b T$ .

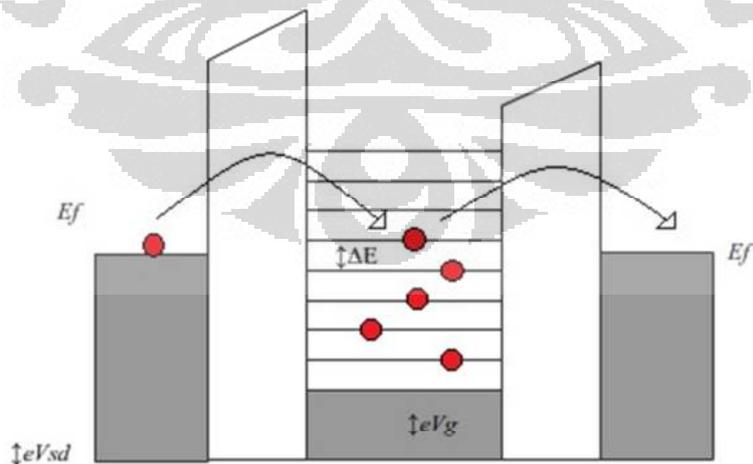
## 2.2 Single Electron Transistor (SET) dan Fenomena di Dalamnya

*Single electron transistor* merupakan sebuah rangkaian yang terdiri dari sebuah konduktor kecil atau yang lebih dikenal dengan sebutan *island* yang terhubung dengan *tunnel junction* dan kapasitor serta sebuah sumber tegangan ideal yang mengontrol rangkaian [3]. Bentuk geometris dan rangkaian SET ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Ketika *bias voltage* sebesar nol, maka energi *fermi* dari kedua *source* dan *drain* akan berada dalam kondisi *equilibrium* sampai *bias voltage* dinaikan. Sebuah elektron akan menerobos secara bebas melewati *tunnel junction* dari *source* ke *drain* melalui *dot* ketika ada ruang kosong pada level energi dari *island* yang berada diantara *fermi level* dari elektroda. *Electron tunneling* juga merubah potensial elektrostatik dari *island* sekaligus mendistribusikan muatan dalam rangkaian. Dengan mengatur tegangan *gate*, maka level energi dapat dinaikan dan mengontrol tambahan dari perpindahan elektron sehingga membuat kondisi *on* dan *off* dari divais [4]. Skematik dari band diagram SET bisa dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1 (a) *Geometry of SET*, (b) *Equivalent circuit of SET of tunnel and non-tunnel junctions with ideal voltage source*, (c) *SET with double island*. [3]



Gambar 2.2 Schematic band diagram of the single-electron transistor.

SET memanfaatkan fenomena single electron dalam beroperasi. Di dalam SET dikenal istilah *coulomb blockade*. *Coulomb blockade* adalah penahanan dari arus DC pada tegangan rendah [2]. Dengan kata lain *coulomb blockade* merupakan kondisi sistem dimana saat diberikan satu buah elektron melalui *tunneling* yang melewati lapisan batas energi dari lapisan isolasi tetapi mencegah adanya tambahan elektron lain untuk melakukan *tunneling*.

Ada 2 syarat agar *coulomb blockade* bisa terjadi. Syarat tersebut ditunjukkan dalam uraian di bawah ini [5]..

a. Tunnel resistance minimum untuk satu elektron charging

Untuk meperhitungkan Heisenberg Energy Uncertainty dari elektron digunakan persamaan,

$$\Delta E \Delta t > h / 4\pi \quad (2.1)$$

Hubungan antara energi gap dengan elektron dan waktu untuk charging kapasitansi melewati tunnel resistor digunakan persamaan,

$$\Delta E = e^2 / 2C \quad \Delta t \cong R_T C \quad (2.2)$$

Sehingga besar tunnel resistor  $R_T$  ditunjukkan oleh persamaan,

$$R_T > h / 2\pi e^2 = 25813\Omega \approx 26k\Omega \quad (2.3)$$

b. Batas suhu

Energi kinetik termal dari elektron harus kurang dari energi tolakan *coulomb* yang ditunjukkan oleh persamaan,

$$E_k \ll E_{c_{\min}} \quad (2.4)$$

$$K_b * T \ll e^2 / 2C_{\text{total}}$$

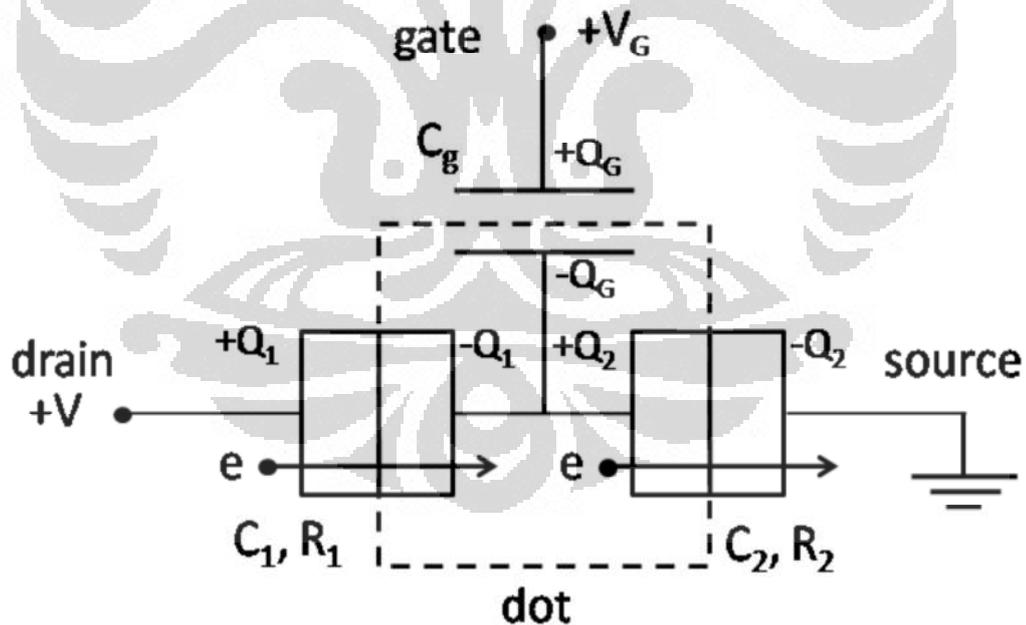
Jika energi kinetik termal lebih besar dari energi tolakan *coulomb* maka bisa mengakibatkan pengurangan pada arus yang berujung pada *blockade*.

Selain kedua syarat tersebut, ada kondisi lain yang menentukan ada tidaknya *coulomb blockade*. *Coulomb blockade* hanya ada jika *bias voltage* yang diberikan tidak lebih besar dari *charging energy* dibagi kapasitansi yang ditunjukkan oleh persamaan,

$$V_{\text{bias}} < e/C \quad (2.5)$$

Akibatnya besar *bias voltage* yang diberikan agar *coulomb blockade* ada sangatlah kecil atau dengan kata lain *coulomb blockade* hanya ada untuk kondisi low bias voltage [2].

Struktur yang biasa digunakan pada SET yaitu struktur Double Barrier Tunnel Junction (DBJT) yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Terdapat 4 persamaan utama untuk menentukan karakteristik arus dan tegangan dari SET yaitu *free energy charge*, *tunneling probability/rate*, *steady state master equation*, dan *current equation* [5].



Gambar 2.3 Single electron transistor mempunyai struktur dot di tengah yang diapit oleh dua tunnel capacitor dan satu gate capacitor. Source dihubungkan ke ground dengan drain dan gate masing-masing diberi tegangan  $V$  dan  $V_G$ . [5]

*Tunneling* dari *single electron* selalu terjadi secara acak dengan *rate* tertentu yang bergantung pada perubahan energi elektrostatis dari sistem. *Tunneling rate* merupakan fungsi dari *junction tunneling capacitances* ( $C_D, C_S$ ), *junction tunneling resistance* ( $R_D, R_S$ ), dan suhu ( $T$ ) [4].

*Tunneling probability/rate:*

$$\Gamma_1^\pm(N) = \frac{1}{R_1 e^2} \left[ \frac{-\Delta F_1^\pm}{1 - \exp[\Delta F_1^\pm / k_B T]} \right] \quad (2.6)$$

$$\Gamma_2^\pm(N) = \frac{1}{R_2 e^2} \left[ \frac{-\Delta F_2^\pm}{1 - \exp[\Delta F_2^\pm / k_B T]} \right] \quad (2.7)$$

*Free energy change:*

$$\Delta F_1^\pm(n_1, n_2) = \frac{e}{C_\Sigma} \left\{ \frac{e}{2} \pm (Ne - Q_0) \mp (C_G + C_2)V \pm C_G V_G \right\} \quad (2.8)$$

$$\Delta F_2^\pm(n_1, n_2) = \frac{e}{C_\Sigma} \left\{ \frac{e}{2} \mp (Ne - Q_0) \mp C_1 V \mp C_G V_G \right\} \quad (2.9)$$

*Steady State Master Equation:*

$$\rho(N) [\Gamma_2^-(N) + \Gamma_1^+(N)] = \rho(N+1) [\Gamma_2^+(N+1) + \Gamma_1^-(N+1)] \quad (2.10)$$

*Current Equation:*

$$I(V) = e \sum_{N=-\infty}^{\infty} \rho(N) [\Gamma_1^+(N) - \Gamma_1^-(N)] = e \sum_{N=-\infty}^{\infty} \rho(N) [\Gamma_2^+(N) - \Gamma_2^-(N)] \quad (2.11)$$

Dengan  $e$  adalah muatan elektron,  $k_B$  adalah konstanta Boltzmann,  $T$  adalah suhu,  $N$  adalah jumlah elektron di dalam dot,  $n_1$  and  $n_2$  adalah jumlah elektron yang melewati kapasitor  $C_1$  and kapasitor  $C_2$ ,  $Q_0$  adalah background charge, dan +/-

menunjukkan bahwa elektron menerobos melewati kapasitor dengan arah dari kiri ke kanan maupun sebaliknya.

Dengan membuat *free electrostatic energy* dari kedua tunnel junctions menjadi nol pada Persamaan (2.6) dan Persamaan (2.7) , maka bisa dibentuk persamaan untuk batas daerah kestabilan. Setiap daerah kestabilan ini dibentuk oleh 4 buah garis sehingga seperti bentuk berlian (*diamond*) yang ditunjukkan Gambar 2.3. Bentuk ini ditentukan oleh *junction capacitances, background charges and type of biasing* [4].

Untuk melakukan simulasi dari *tunneling electron*, maka rate dari keseluruhan kemungkinan tunneling events harus ditentukan[3]. *Tunneling rate* ditunjukkan oleh Persamaan (2.8) dan Persamaan (2.9).

*Master equation* digunakan untuk melakukan simulasi dari rangkaian *single electron* berdasarkan *orthodox theory* [4]. *Master equation* dengan *kondisi steady state* ditunjukkan oleh Persamaan (2.10) dan dari Persamaan (2.10) itu akan menghasilkan nilai  $\rho(N)$ . Nilai ini yang kemudian akan digunakan pada perhitungan arus pada Persamaan (2.11).

### 2.3 SET dengan superconducting island

Ketika SET menggunakan *superconducting island*, ada hal yang berbeda dengan SET biasa. Hal tersebut yaitu terjadi pasangan elektron yang berujung ke perbedaan energi ganjil-genap. Perbedaan energi ini lebih besar dari *charging energy* sehingga SET harus berada pada kondisi suhu dan tegangan yang sangat rendah. Selain itu hal ini juga menyebabkan muatan hanya dapat berpindah oleh 2 elektron. Tunneling 2 elektron ini akan dikenal sebagai *Andreev reflection* [6].

Karena terjadi hal yang berbeda dari SET biasa maka perhitungan karakteristik SET *superconducting island* menjadi berbeda.

*Free energy state:*

$$F(n, m) = \frac{(-en + Q_0)^2}{2C_\Sigma} - \left[ m + n \frac{(C_2 - C_1)}{C_\Sigma} \right] \frac{eV}{2} + p_n \Delta \quad (2.12)$$

Dengan  $n$  ( $n_1 - n_2$ ) adalah jumlah elektron yang berlebih pada *island* dan  $m$  ( $n_1 + n_2$ ) adalah jumlah elektron yang menerobos melewati salah satu *junction*,  $p_n = 0$  jika  $n$  genap dan 1 jika  $n$  ganjil.

*Andreev reflection rate across junction:*

$$\Gamma_i^A(\Delta F_i) = \frac{G_i^A}{e^2} \frac{\Delta F_i}{\exp(\Delta F_i / k_b T) - 1} \quad (2.13)$$

Dengan  $\Delta F_i$  merupakan perpindahan kedua buah elektron dan  $G_i^A$  adalah konduktansi Andreev dari *junction*  $i$ . Dengan menggunakan Persamaan (2.12) dan Persamaan (2.13) maka *rate*  $\Gamma_1^A$  dan  $\Gamma_2^A$  dapat dihitung sebagai fungsi  $Q_0$ .

*Current through system:*

$$I(Q_0) = 2e \frac{1}{(\Gamma_1^A)^{-1} + (\Gamma_2^A)^{-1}} = 2e \frac{\Gamma_1^A \Gamma_2^A}{\Gamma_1^A + \Gamma_2^A} \quad (2.14)$$

Ketika suhu rendah,  $\Delta$  bisa dibuat ke bentuk yang lebih mudah dan mendekati linearitas dengan hubungan suhunya[7].

$$\Delta \approx E_{gap} - k_B T \ln N_{eff}(T) \quad (2.15)$$

Dengan  $E_{gap}$  adalah *superconducting gap* dan  $N_{eff}(T)$  adalah jumlah efektifitas dari kondisi *quasiparticle* yang ada untuk eksitasi panas. *The corresponding entropy is  $k_B \ln(N_{eff})$ . The low temperature approximation* ditunjukkan oleh Persamaan (2.16).

$$N_{eff}(T) \approx V_l \rho_n(0) \sqrt{2\pi E_{gap} k_B T} \quad (2.16)$$

Dengan  $V_1$  adalah volume dari *superconducting island* dan  $p_n(0)$  adalah *normal density of states* (termasuk *spin degeneracy*) pada *island* per satuan energi dan per satuan volume.

Kenaikan suhu akan membuat  $\Delta$  secara perlahan menurun sampai nol, sampai di titik dimana periodik dari kurva I-Q<sub>0</sub> berubah dari 2e menjadi e.

Suhu *crossover*  $T_0^*$  didefinisikan sebagai suhu dimana menjadi nol pada perkiraan dekat linear persamaan,

$$T_0^* = \frac{E_{gap}}{k_B \ln N_{eff}(T_0^*)} \quad (2.17)$$

Nilai dari energy gap E pada suhu T dengan suhu kritis  $T_c$  diprediksikan oleh teori BCS. Perbandingan nilai dari energy gap pada suhu nol dan nilai dari suhu transisi superkonduksi (*expressed in energy units*) menggunakan nilai umum sebesar 3.5, tergantung dari material yang digunakan. Hubungan dekat suhu kritis ditunjukkan oleh Persamaan (2.18) [8].

$$E_{gap} = 3.52 k_B T_C \sqrt{1 - (T / T_C)} \quad (2.18)$$

Persamaan (2.18) merupakan ajuan dari tahun sebelumnya oleh M. J. Buckingham di *Very High Frequency Absorption* pada Superkonduktor berdasarkan fakta bahwa fase transisi *superconducting* adalah *second order*, bahwa fase *superconducting* mempunyai *gap* massa dan pada hasil percobaan Blevins, Gordy and Fairbank's di tahun sebelumnya pada absorpsi dari gelombang milimeter oleh *superconducting tin*.

### BAB 3. RANCANGAN SIMULASI

Simulasi ini terbagi menjadi 3 bagian. Setiap bagian memiliki perancangan masing-masing tetapi menggunakan struktur divais SET yang sama. Struktur SET yang digunakan untuk simulasi tersebut bisa dilihat pada Gambar 2.3 di bab 2. Berikut perancangan untuk setiap bagian.

#### 3.1 Rancangan diagram kestabilan

Untuk melakukan simulasi diagram kestabilan, langkah pertama yaitu menentukan nilai parameter atau nilai variabel yang akan digunakan. Penentuan nilai parameter-parameter atau nilai variabel yang akan digunakan untuk melakukan simulasi SET harus memenuhi persyaratan terjadinya *coulomb blockade*. Untuk melakukan simulasi perbandingan maka minimal harus digunakan 2 buah divais dengan nilai parameter yang berbeda. Karena itulah disiapkan 2 buah SET (SET A dan SET B) dengan nilai variabel yang diambil dari referensi [5] yang ditunjukkan pada Tabel 3.1 dan referensi [4] ditunjukkan pada Tabel 3.2 untuk melakukan perbandingan besar *diamond* pada diagram kestabilan.

Setelah menentukan nilai-nilai variabel yang akan digunakan untuk simulasi, maka langkah selanjutnya yaitu mengecek apakah nilai-nilai variabel tersebut memenuhi persyaratan terjadinya Coulomb Blockade. 2 syarat utama ter-

Tabel 3.1 Nilai Variabel SET A

Variables	Value
C1/Cd	$1 \times 10^{-20}$ Farad
C2/Cs	$1 \times 10^{-17}$ Farad
Cg	$1 \times 10^{-17}$ Farad
R1	100 M $\Omega$
R2	100 M $\Omega$
T	3 K
Qo	0

jadinya *coulomb blockade* yaitu:

- a) *Thermal energy*  $\ll$  *Charging energy*
- b)  $R_{\text{tunneling}} > 26 \text{ k}\Omega$

Tabel 3.2 Nilai Variabel SET B

Variables	Value
C1/Cd	$1 \times 10^{-18}$ Farad
C2/Cs	$1 \times 10^{-18}$ Farad
Cg	$1 \times 10^{-18}$ Farad
R1	1 M $\Omega$
R2	1 M $\Omega$
T	3 K
Qo	0

Berikut ini pengecekan nilai variabel untuk SET A.

- a.  $\text{Thermal energy} = k_b \cdot T = 4.143 \times 10^{-23}$   
 $\text{Charging energy} = e^2 / C_{\text{total}} = 6.4128 \times 10^{-22}$   
*Thermal energy* jauh lebih kecil dari *Charging energy*;
- b.  $R_1$  dan  $R_2$  bernilai 100 M $\Omega$  maka nilainya lebih besar dari 26 k $\Omega$ .

Berikut ini pengecekan nilai variabel untuk SET B.

- a.  $\text{Thermal energy} = k_b \cdot T = 4.143 \times 10^{-23}$   
 $\text{Charging energy} = e^2 / C_{\text{total}} = 8.5547 \times 10^{-21}$   
*Thermal energy* jauh lebih kecil dari *Charging energy*;
- b.  $R_1$  dan  $R_2$  bernilai 1 M $\Omega$  maka nilainya lebih besar dari 26 k $\Omega$ .

Karena untuk SET A dan SET B, keduanya sudah memenuhi terjadinya kondisi *coulomb blockade*, maka langkah selanjutnya yaitu memasukan nilai-nilai variabel tersebut ke dalam simulasi. Sedangkan jika tidak memenuhi terjadinya kondisi *coulomb blockade*, maka nilai-nilai variabel tersebut harus diubah sampai memenuhi kondisi *coulomb blockade*.

### 3.2 Rancangan coulomb oscillation

Sama seperti sebelumnya, langkah pertama yaitu menentukan nilai variabel yang akan digunakan untuk melakukan simulasi. Kemudian langkah selanjutnya yaitu mengecek apakah nilai variabel tersebut memenuhi syarat terjadinya *coulomb blockade* atau tidak. Jika tidak memenuhi maka nilai variabel tersebut harus diubah dan dicek kembali sampai memenuhi syarat terjadinya *coulomb blockade*. Pada simulasi ini, digunakanlah nilai variabel SET A yang sudah memenuhi syarat terjadinya *coulomb blockade*. Di dalam simulasi ini terdapat 2 jenis simulasi. Simulasi yang pertama yaitu simulasi bentuk *coulomb oscillation*. Simulasi yang kedua yaitu simulasi hubungan *coulomb oscillation* dengan suhu.

#### 3.2.1 Rancangan simulasi bentuk *coulomb oscillation*

Untuk simulasi ini setelah menentukan dan mengecek nilai variabel yang digunakan, maka selanjutnya dilakukan penentuan besar tegangan  $V_{\text{bias}}$  yang akan diberikan. Di dalam simulasi ini terdapat 2 kondisi yaitu kondisi dimana tegangan  $V_{\text{bias}}$  yang diberikan ada yang melewati *coulomb blockade* dan kondisi dimana tegangan  $V_{\text{bias}}$  yang diberikan tidak ada yang melewati *coulomb blockade*.

Untuk kondisi yang melewati *coulomb blockade* maka besar nilai  $V_{\text{bias}}$  yang diberikan tidak boleh lebih daripada charging energy dibagi kapasitansi sesuai Persamaan (2.5).

$$V_{\text{bias}} < e/C$$

$$V_{\text{bias}} < 0.008 \text{ volt}$$

Karena itu tegangan  $V_{\text{bias}}$  yang boleh digunakan untuk kondisi ini bebas asalkan kurang dari 0.008 volt.

Sedangkan untuk kondisi yang tidak melewati *coulomb blockade* maka besar nilai  $V_{\text{bias}}$  yang diberikan harus lebih besar daripada charging energy dibagi kapasitansi sesuai Persamaan (2.5).

$$V_{\text{bias}} < e/C$$

$$V_{\text{bias}} > 0.008 \text{ volt}$$

Karena itu tegangan  $V_{\text{bias}}$  yang boleh digunakan untuk kondisi ini bebas asalkan lebih dari 0.008 volt.

### 3.2.2 Rancangan simulasi hubungan *coulomb oscillation* dengan suhu

Untuk simulasi ini setelah menentukan dan mengecek nilai variabel yang digunakan, maka selanjutnya dilakukan menentukan batas maksimal suhu yang bisa digunakan. Nilai variabel yang digunakan untuk simulasi ini masih menggunakan nilai variabel dari SET A tetapi dengan besar suhu maksimal yang bisa digunakan sesuai syarat *coulomb blockade* sesuai Persamaan (2.4).

$$E_k \ll E_{c_{\text{min}}}$$

$$k_B \cdot T \ll e^2/2C_{\text{total}}$$

$$1.381 \times 10^{-23} \cdot T \ll 6.4128 \times 10^{-22}$$

$$T \ll 46.4359 \text{ K}$$

Dari perhitungan itu diperoleh bahwa besar nilai suhu maksimal yang bisa digunakan  $\pm 46.4359 \text{ K}$ . Penentuan penggunaan suhu bebas asalkan tidak melebihi 46.4359 K. Untuk simulasi ini digunakan 4 buah kombinasi suhu yaitu 5 K, 15 K, 25 K, dan 35 K.

Di dalam simulasi ini juga terdapat 2 kondisi yaitu kondisi dimana tegangan  $V_{\text{bias}}$  yang diberikan ada yang melewati *coulomb blockade* dan kondisi dimana tegangan  $V_{\text{bias}}$  yang diberikan tidak ada yang melewati *coulomb blockade*. Untuk kedua kondisi ini digunakanlah 4 buah kombinasi suhu yang sama yaitu 5 K, 15 K, 25 K, dan 35 K.

### 3.3 Rancangan SET superconducting island

Sama seperti sebelumnya, langkah pertama untuk melakukan simulasi ini yaitu menentukan nilai variabel yang akan digunakan. Untuk simulasi SET

dengan *superconducting island* ini menggunakan variabel yang sedikit berbeda dari SET dengan *island* biasa. Nilai variabel yang digunakan untuk simulasi ini diambil dari referensi [6] dan ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Nilai Variabel SET *superconducting island*

Variables	Value
C1/Cd	$430 \times 10^{-18}$ Farad
C2/Cs	$310 \times 10^{-18}$ Farad
Cg	$67 \times 10^{-18}$ Farad
R1	53.5 k $\Omega$
R2	53.5 k $\Omega$
G <sub>1</sub> <sup>A</sup>	$8.6 \times 10^{-9} \Omega^{-1}$
G <sub>2</sub> <sup>A</sup>	$4.1 \times 10^{-9} \Omega^{-1}$
T	50 mK
$\Delta$	$245 \times 10^{-6}$ eV

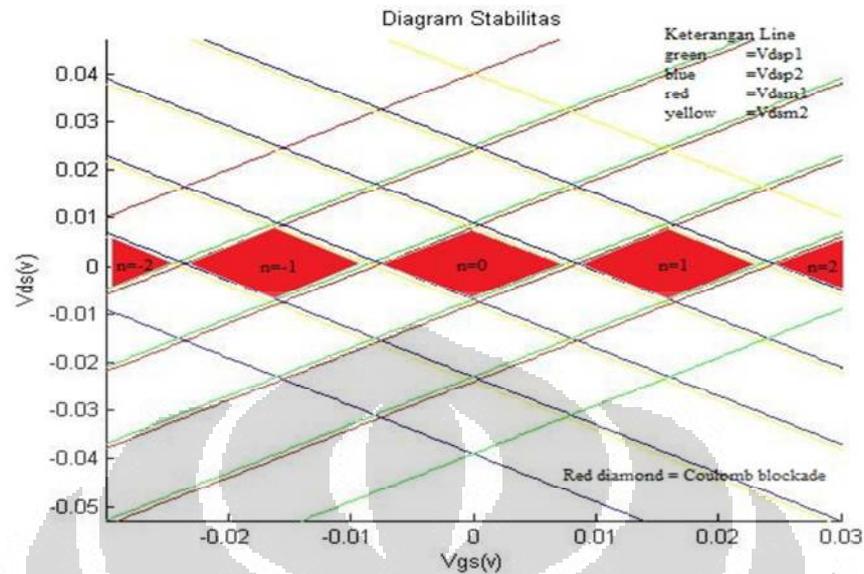
## Bab 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Diagram Kestabilan

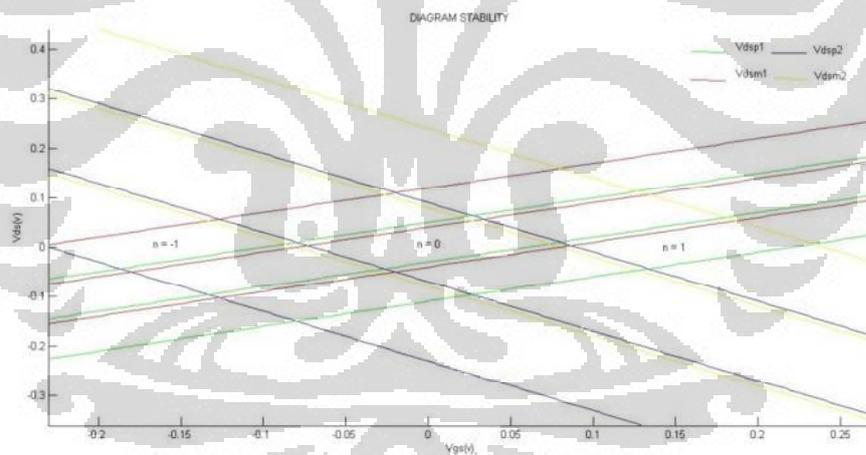
Setiap divais SET akan memiliki diagram kestabilan masing-masing. Diagram kestabilan ini berguna untuk menentukan apakah SET berada dalam kondisi on atau off. Kondisi on dan off ditentukan keberadaan SET pada kondisi *coulomb blockade* atau tidak. *Coulomb blockade* ini berfungsi untuk menentukan apakah terjadi tunneling electron atau tidak. Jadi ketika SET berada pada kondisi coulomb blockade maka tidak terjadi *tunneling electron* sedangkan jika tidak berada pada kondisi coulomb blockade maka terjadi *tunneling electron*. Diagram kestabilan ini terbentuk dari banyak bentuk *diamond* atau berlian. Bentuk atau tinggi *diamond* dari diagram kestabilan setiap divais SET akan berbeda-beda. Bentuk atau tinggi *diamond* ini ditentukan oleh besaran kapasitansi dari junction 1, junction 2, dan gate. Hal ini bisa dilihat dari hasil simulasi pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Dari Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 bisa terlihat bagaimana bentuk dan tinggi *diamond* yang cukup berbeda. Selain itu dari *diamond-diamond* tersebut bisa dibagi menjadi 2 bagian atau kondisi sesuai teori yang ada. 2 kondisi itu ditunjukkan dalam uraian di bawah ini.

#### 1. Daerah stabil

Daerah-daerah stabil ini dibentuk oleh *diamond* yang dilewati oleh sumbu  $x(V_{GS})$  dengan sumbu  $y(V_{DS}) = 0$ . Jika dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 maka daerah-daerah stabil itu ditunjukkan oleh *diamond* yang berwarna merah. Daerah ini disebut daerah stabil karena arus pada daerah ini konstan. Hal ini disebabkan jumlah dari elektron yang berada pada daerah tersebut juga konstan. Daerah stabil ini biasa hanya untuk  $V_{DS}$  kecil. Daerah stabil ini lebih dikenal dengan nama *coulomb blockade*. Arus konstan ini mempunyai besar nol, hal ini akan ditunjukkan pada penjelasan hasil simulasi berikutnya.



Gambar 4.1 Diagram Stabilitas untuk  $c_s=1e-20$ ,  $c_d=1e-17$ ,  $c_g=10e-18$



Gambar 4.2 Diagram Stabilitas untuk  $c_s=1e-18$ ,  $c_d=1e-18$ ,  $c_g=1e-18$

## 2. Daerah tidak stabil

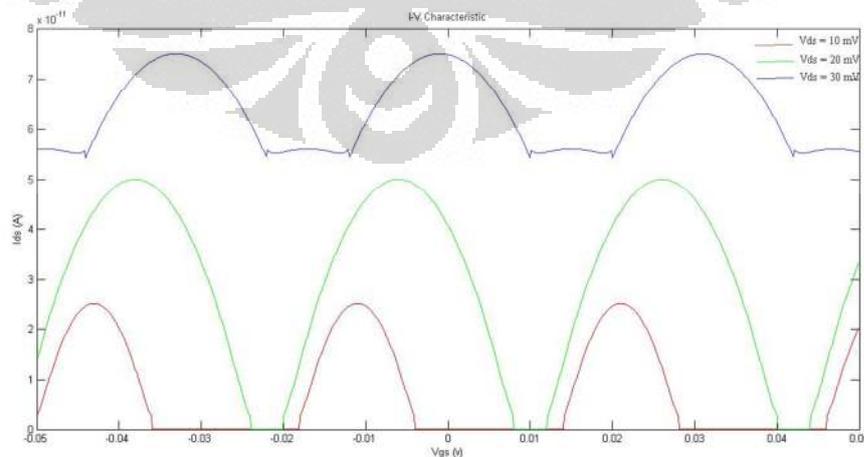
Daerah-daerah tidak stabil dibentuk oleh *diamond-diamond* lainnya atau yang tidak termasuk dalam daerah stabil. Jika dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 maka daerah-daerah stabil itu ditunjukkan oleh *diamond* yang tidak berwarna atau selain *diamond* berwarna merah. Daerah ini disebut daerah tidak stabil

karena arus pada daerah ini tidak konstan. Hal ini disebabkan karena jumlah dari elektron yang berada pada daerah tersebut juga tidak konstan. Besar arus pada daerah tidak stabil ini akan semakin meningkat jika semakin jauh dari batas daerah stabil. Besar peningkatan arus ini bisa dilihat pada gambar hasil simulasi berikutnya.

Dari hasil simulasi bisa disimpulkan bahwa untuk setiap divais SET yang memiliki besar kapasitansi yang berbeda akan menghasilkan besar *coulomb blockade* yang berbeda pula. Karena besar atau tinggi *coulomb blockade* yang berbeda-beda inilah yang mengakibatkan karakteristik arus dan tegangan dari setiap divais SET pun akan berbeda juga.

#### 4.2 Coulomb Oscillation

Dari diagram stabilitas bisa dilihat terjadi perulangan *diamond-diamond* dengan suatu periode yang tetap. Jika  $V_{ds}$  dibuat tetap dan  $V_{gs}$  dinaikan maka arus akan berosilasi. Osilasi ini disebut Coulomb Oscillation. Coulomb Oscillation ini berguna untuk mengindikasikan apakah suatu divais bekerja berdasarkan fenomena single electron atau tidak. Dari hasil simulasi pada Gambar 4.3 bisa terlihat bahwa terjadi bentuk gunung dan lembah dengan suatu periode tertentu. Bisa dilihat bahwa ketika  $V_{ds}$  dinaikan maka besar arus yang dihasilkan juga akan meningkat.



Gambar 4.3 Coulomb Oscillation dengan  $V_{ds}$  yang berbeda

### 4.2.1 Bentuk Coulomb Oscillation

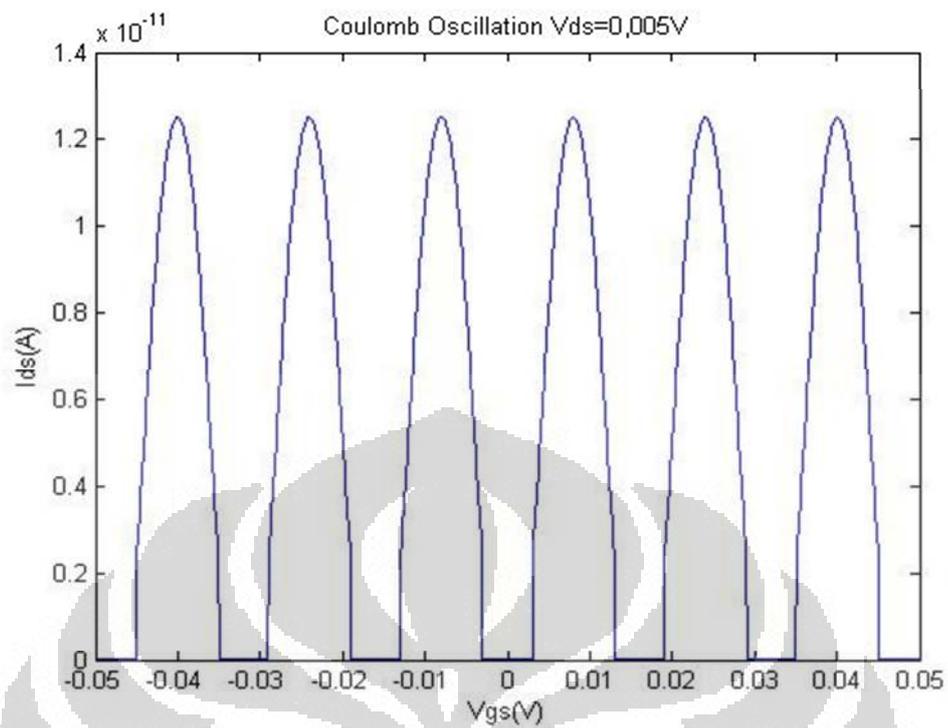
*Coulomb oscillation* memiliki bentuk yang berbeda untuk 2 kondisi SET dalam diagram stabilitas. 2 kondisi itu ditunjukkan dalam uraian di bawah ini.

#### 4.2.1.1 Kondisi yang ada melewati *coulomb blockade*

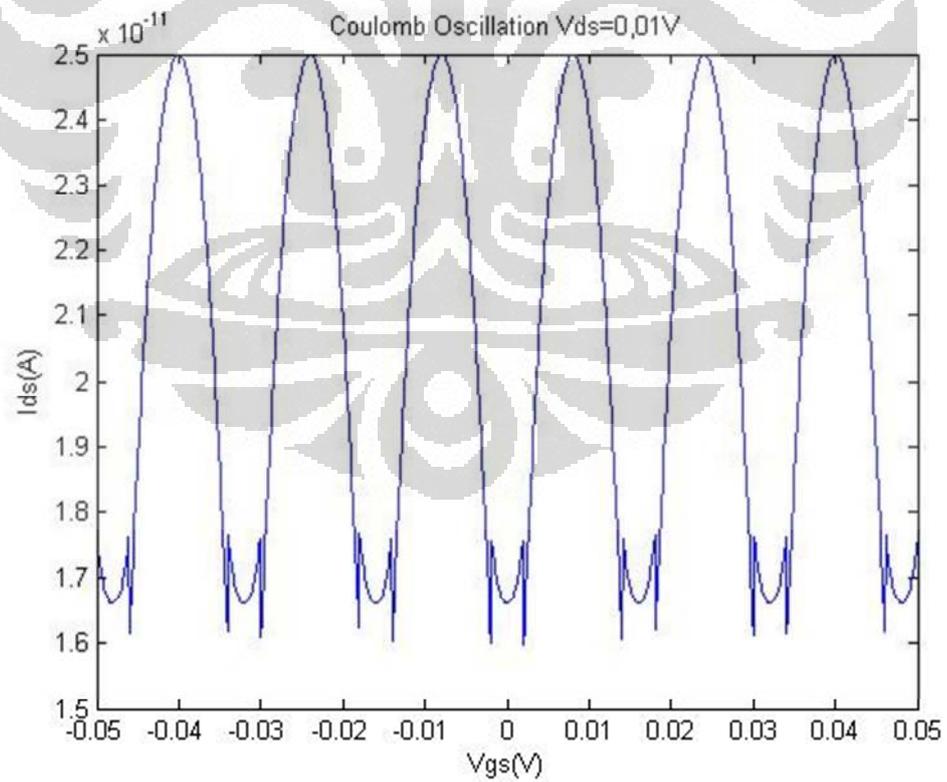
Ketika menggunakan  $V_{ds}$  sebesar 0.005 volt maka ada bagian yang melewati *coulomb blockade* (*red diamond* pada Gambar 4.1). Karena ada bagian yang melewati bagian *coulomb blockade* tersebut maka bentuk *coulomb oscillation* ditunjukkan oleh hasil simulasi pada Gambar 4.4. Pada Gambar 4.4 bisa dilihat bahwa ketika besar  $V_{gs} = 0$  v maka tidak ada arus yang mengalir ( $I_{ds}$  bernilai 0 A) tetapi ketika  $V_{gs} = 0.01$  volt terdapat arus yang mengalir. Bentuk ini menunjukkan bahwa ketika besar arus tidak nol atau terdapat arus yang mengalir maka SET berada dalam kondisi menyala. Sedangkan ketika arus sama dengan nol atau tidak ada arus yang mengalir maka SET berada dalam kondisi tidak menyala.

#### 4.2.1.2 Kondisi yang sama sekali tidak melewati Coulomb Blockade

Ketika menggunakan  $V_{ds}$  sebesar 0.01 volt maka tidak ada sama sekali bagian yang melewati *coulomb blockade* (*red diamond* pada Gambar 4.1). Karena tidak ada bagian yang melewati *coulomb blockade* maka bentuk *coulomb oscillation* ditunjukkan oleh hasil simulasi pada Gambar 4.5. Pada Gambar 4.5 bisa dilihat bahwa ketika  $V_{gs}$  bernilai nol ada arus yang mengalir dan ketika  $V_{gs}$  bernilai 0.01 volt juga ada arus yang mengalir. Artinya dengan nilai  $V_{gs}$  yang berbeda-beda tetap terdapat arus yang mengalir. Ini menunjukkan bahwa SET berada dalam kondisi menyala terus menerus walaupun dengan besar arus yang berbeda-beda.

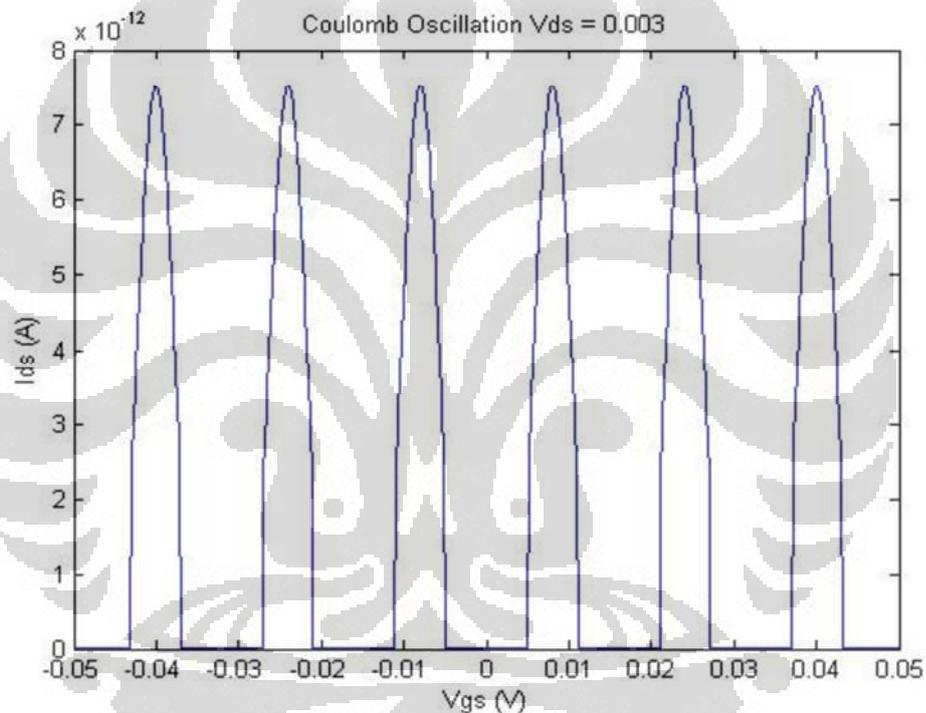


Gambar 4.4 Coulomb Oscillation untuk  $V_{ds} = 0.005$  V



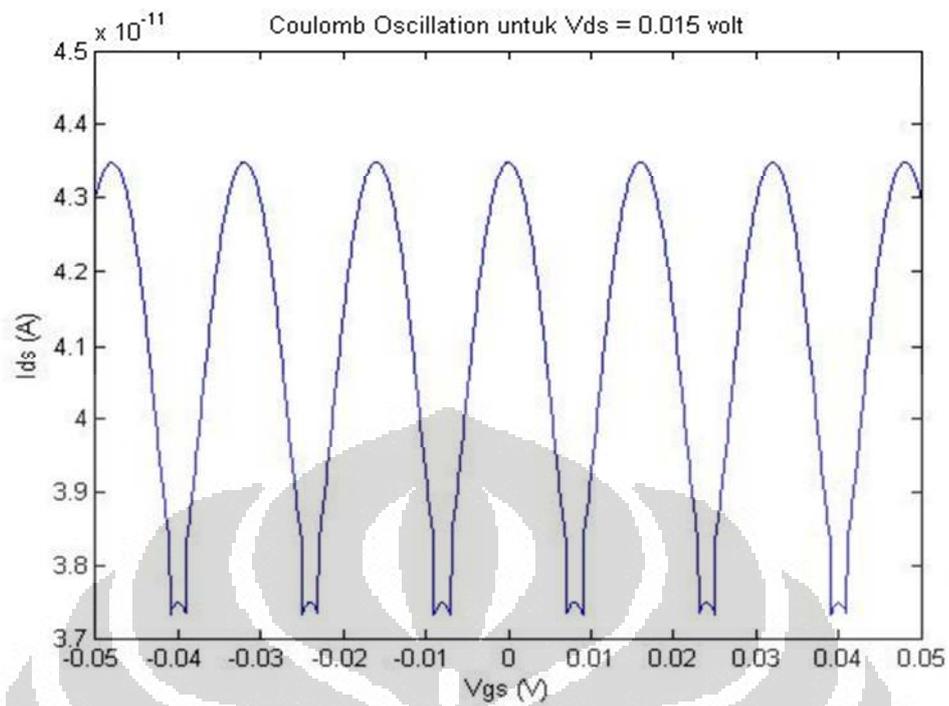
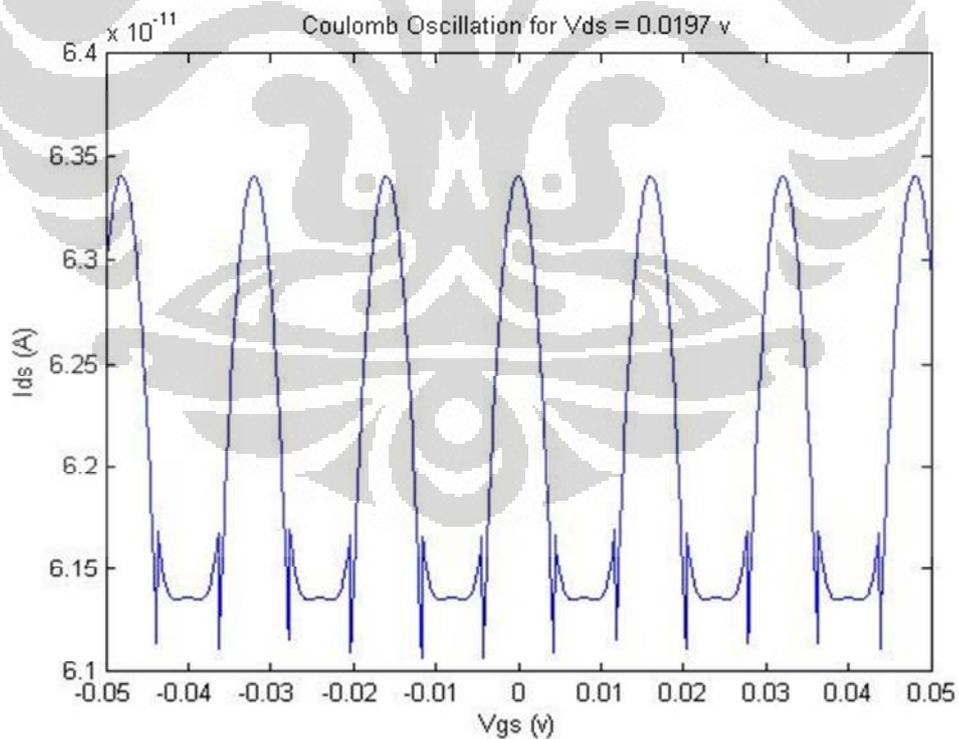
Gambar 4.5 Coulomb Oscillation untuk  $V_{ds} = 0.01$  V

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4 dan Gambar 4.6 bisa dilihat bahwa untuk kondisi ada yang melewati *coulomb blockade* maka bentuk gunung dan lembah (*coulomb oscillation*) akan memiliki bentuk yang sama dengan beda besar arus yang dihasilkan pada bagian gunung. Besar arus ini akan meningkat seiring kenaikan tegangan  $V_{ds}$  yang diberikan. Sedangkan lebar gunung itu ditentukan oleh besar *diamond* tidak berwarna (yang bukan *coulomb blockade*) yang dilewati. Semakin besar *diamond* tidak berwarna yang dilewati maka semakin lebar gunung yang dibentuk.



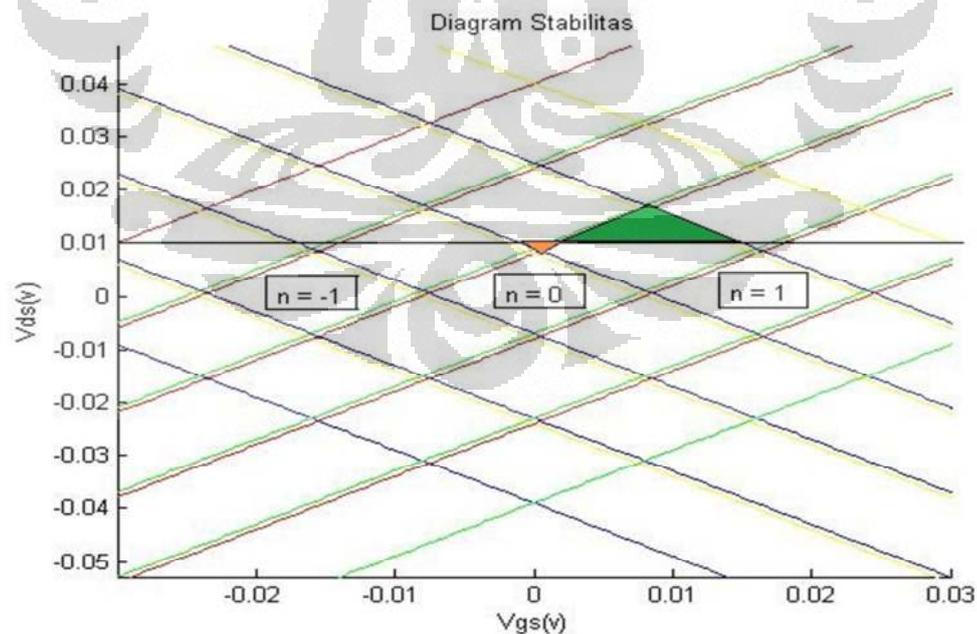
Gambar 4.6 Coulomb Oscillation untuk  $V_{ds} = 0.003$  V

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Gambar 4.5, Gambar 4.7, dan Gambar 4.8 bisa dilihat bahwa bentuk coulomb oscillation yang dihasilkan pun agak berbeda. Bentuk itu disebabkan oleh perubahan energi antar *diamond* pada diagram stabilitas. Bentuk-bentuk ini berbeda satu sama lain karena dibentuk oleh perbandingan tinggi antar *diamond* atas dan bawah yang dilalui. Selain itu perbandingan ini juga menentukan ketinggian dari gunung dan lembah atau arus yang dihasilkan.

Gambar 4.7 Coulomb Oscillation untuk  $V_{ds} = 0.015$  VGambar 4.8 Coulomb Oscillation untuk  $V_{ds} = 0.0197$  V

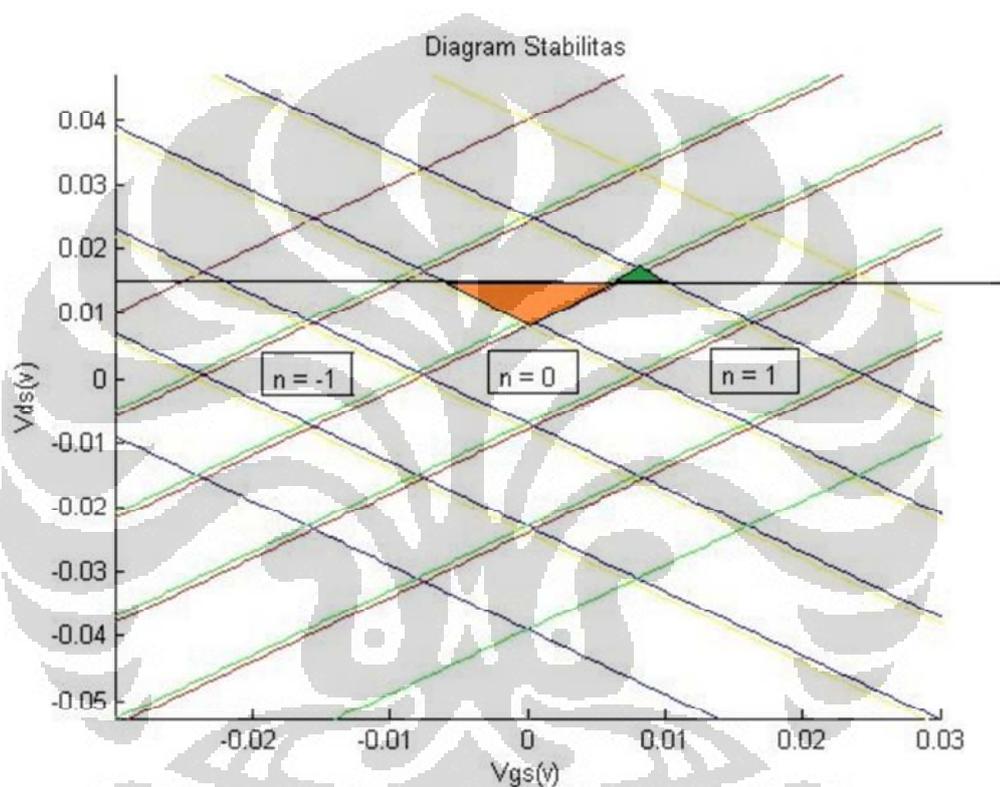
Semua bentuk gunung akan ditentukan oleh segitiga biasa dan ketinggian gunung atau arus yang dihasilkan akan ditentukan oleh besar dari segitiga tersebut. Sedangkan untuk bentuk lembah ditentukan oleh segitiga terbalik dan ketinggiannya agak sedikit berbeda. Bentuk lembah dan ketinggiannya ini ditentukan juga berdasarkan tinggi segitiga. Berikut ini akan dijelaskan mengenai bentuk lembah yang dibentuk karena bentuk yang gunung sudah cukup jelas sesuai bentuk segitiga biasa dengan ketinggian sesuai tinggi segitiga tersebut. Semakin besar segitiga maka semakin besar arus yang dihasilkan.

Yang pertama untuk kondisi hasil simulasi pada Gambar 4.5 dengan nilai  $V_{ds}$  sebesar 0.01 volt. Dari Gambar 4.9 bisa dilihat bahwa bagian *diamond* atas memiliki tinggi lebih kecil daripada bagian *diamond* bawah. Karena segitiga terbalik yang berwarna oranye yang berada di *diamond* atas memiliki tinggi lebih kecil dari segitiga berwarna hijau yang berada di *diamond* bawah akibatnya terbentuklah lembah atau bentuk huruf u seperti yang ditunjukkan oleh hasil simulasi pada Gambar 4.5.



Gambar 4.9 Perbandingan tinggi *diamond* yang dilewati oleh  $V_{ds}$  sebesar 0.01 V

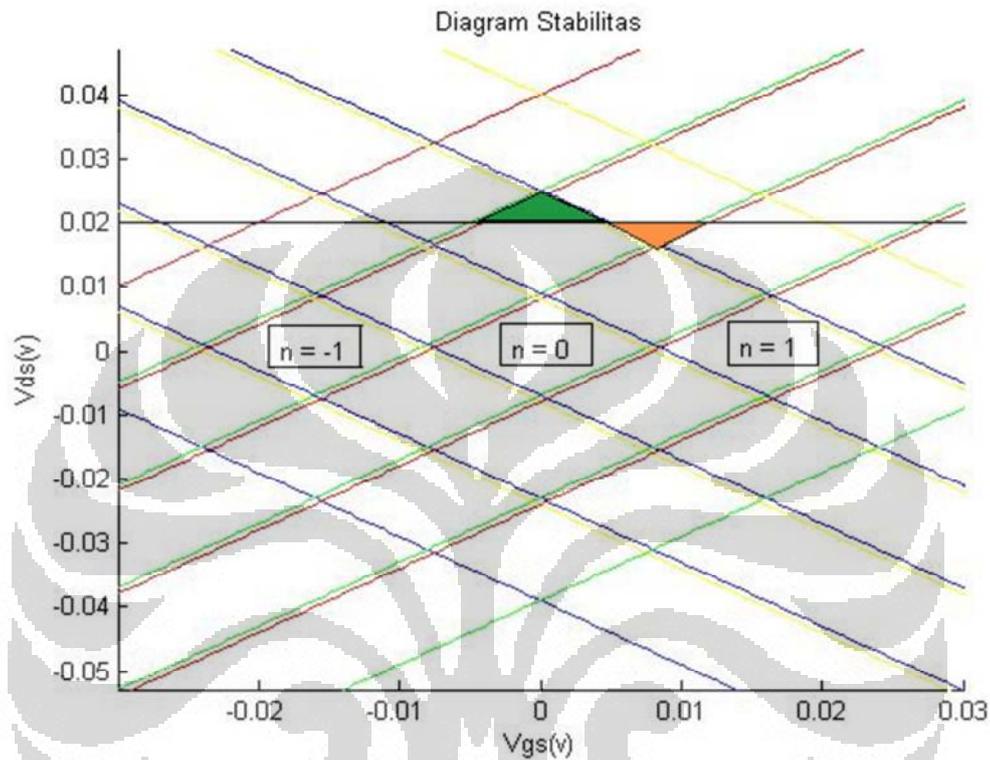
Yang kedua untuk kondisi hasil simulasi pada Gambar 4.7 dengan nilai  $V_{ds}$  sebesar 0.015 volt. Dari Gambar 4.10 bisa dilihat bahwa bagian *diamond* atas memiliki tinggi lebih besar daripada bagian *diamond* bawah. Karena segitiga terbalik yang berwarna oranye yang berada di *diamond* atas memiliki tinggi lebih besar dari segitiga berwarna hijau yang berada di *diamond* bawah akibatnya terbentuklah gunung atau bentuk huruf n seperti yang ditunjukkan oleh hasil simulasi pada Gambar 4.7.



Gambar 4.10 Perbandingan tinggi *diamond* yang dilewati oleh  $V_{ds}$  sebesar 0.015 V

Yang ketiga untuk kondisi hasil simulasi pada Gambar 4.8 dengan nilai  $V_{ds}$  sebesar 0.0197 volt. Dari Gambar 4.11 bisa dilihat bahwa bagian *diamond* atas memiliki tinggi lebih kecil daripada bagian *diamond* bawah. Karena segitiga terbalik yang berwarna oranye yang berada di *diamond* atas memiliki tinggi lebih kecil dari segitiga berwarna hijau yang berada di *diamond* bawah akibatnya terbentuklah lembah. Akan tetapi bentuk lembah ini bukan berbentuk huruf u melainkan bentuk huruf n seperti yang ditunjukkan oleh hasil simulasi pada

Gambar 4.8. Hal ini disebabkan besar segitiga terbalik sudah melebihi setengah dari segitiga biasa. Jadi dengan kata lain ketika besar segitiga terbalik melebihi setengah dari segitiga biasa maka bentuk lembah u akan menjadi bentuk gunung n..



Gambar 4.11 Perbandingan tinggi *diamond* yang dilewati oleh  $V_{ds}$  sebesar 0.0197 V

Dari hasil simulasi yang diperoleh, kondisi segitiga *diamond* akan tetap menghasilkan bentuk gunung pada coulomb oscillation sedangkan kondisi segitiga terbalik akan menentukan bentuk lembah apakah akan berbentuk gunung atau lembah dengan ketinggian yang lebih rendah atau lebih tinggi dari gunung yang dibentuk oleh segitiga *diamond*. Maka dari hasil yang diperoleh bisa dibuat kombinasi bentuk gunung dan lembah yang terjadi. Kombinasi lembah itu bisa dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 .

Tabel 4.1 Kombinasi tinggi *diamond*

Condition Vds through diamond	Height Upper Diamond	Height Lower Diamond
1	small	large
2	large	small
3	only upper	0
4	0	only lower

Tabel 4.2 Bentuk Lembah

Condition	Bentuk lembah	Ketinggian terhadap puncak
1	Pattern u	Lebih rendah
2	Pattern n	Rendah-tinggi
3	Dot	Tidak ada
4	Dot	Tidak ada

Perubahan bentuk lembah dari bentuk u menjadi bentuk n atau terbentuknya puncak gunung pada bagian lembah *coulomb oscillation* terjadi ketika tinggi segitiga *diamond* bawah lebih besar dari tinggi segitiga *diamond* atas. Karena tinggi segitiga berbanding lurus dengan luasnya, maka ketika semakin besar tinggi segitiga maka semakin besar pula luas atau tinggi segitiga. Salah satu perubahan bentuk lembah tersebut bisa dilihat pada Gambar 4.11.

Data mulai terjadinya perubahan bentuk lembah ini bisa dilihat pada Tabel 4.3. Pada tabel tersebut bisa terlihat beberapa data hasil simulasi yang menunjukkan perbandingan antara tinggi segitiga atas dan bawah yang dibentuk. Dari hasil tersebut bisa dicari rata-ratanya yaitu tinggi segitiga bawah sebesar 32.4 dan tinggi segitiga atas sebesar 47.2. Dari kedua rata-rata tersebut bisa dibuat perbandingan kapan terjadinya bentuk perubahan lembah yaitu sebesar 3.24:4.72. Dengan kata lain, perubahan bentuk lembah terjadi ketika besar segitiga *diamond* atas lebih besar 4.72/3.24 kalinya dari besar segitiga *diamond* bawah atau sekitar

**Universitas Indonesia**

1.5 kalinya. Selain itu dari Tabel 4.3 juga bisa terlihat besar arus yang dihasilkan juga akan meningkat seiring dengan kenaikan  $V_{ds}$  yang diberikan.

Tabel 4.3 Perubahan Bentuk

V <sub>ds</sub> yang merubah bentuk	Batas bawah	Batas atas	Tinggi segitiga bawah	Tinggi segitiga atas	Arus
0.0109 v	0.008 v	0.016 v	0.0029	0.0051	22 pA
0.0197 v	0.016 v	0.024 v	0.0037	0.0043	61.35 pA
0.0283 v	0.024 v	0.032 v	0.0037	0.0043	102.685 pA
0.0368 v	0.032 v	0.040 v	0.0032	0.0048	144.51 pA
0.0453 v	0.040 v	0.048 v	0.0027	0.0051	186.72 pA

#### 4.2.2 Hubungan Coulomb Oscillation dengan suhu

Hubungan Coulomb Oscillation dengan suhu, menggunakan syarat agar SET dapat bekerja. Syarat tersebut yaitu dimana energi charging minimum harus lebih besar dari energi termal sesuai Persamaan (2.4).

$$E_k \ll E_{c_{min}}$$

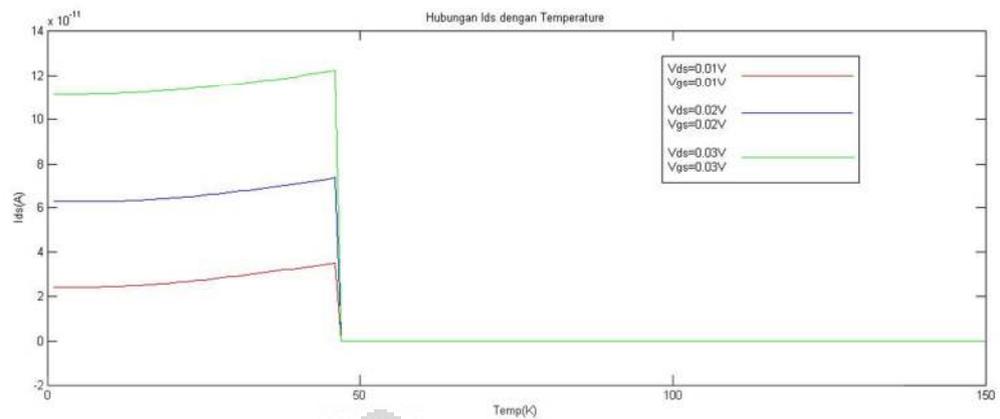
$$k_B \cdot T \ll e^2 / 2C_{total}$$

Dalam simulasi yang dibuat menggunakan  $c_s=1e-20$ ,  $c_d=1e-17$ , dan  $c_g=10e-18$  sehingga :

$$1.381e-23 \cdot T \ll 6.4128e-22$$

Maka besar nilai suhu maksimal  $\pm 46.4359$ .

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12 menunjukkan bahwa ketika menggunakan suhu lebih dari suhu maksimal maka SET berada di kondisi off atau tidak bekerja. Karena SET berada dalam kondisi off maka arus yang dihasilkan akan bernilai nol atau bisa dikatakan SET berada di kondisi Coulomb Blockade. Selain itu, dari hasil simulasi pada Gambar 4.12 bisa dilihat bahwa dengan menaikkan besar *bias voltage*/ $V_{ds}$  maupun *gate voltage*/ $V_{gs}$  maka besar arus yang dihasilkan akan ikut naik juga sampai batas suhu maksimalnya.



Gambar 4.12 Hubungan Ids dengan Suhu

Coulomb oscillation dalam hubungannya dengan suhu juga terbagi dalam 2 kondisi.

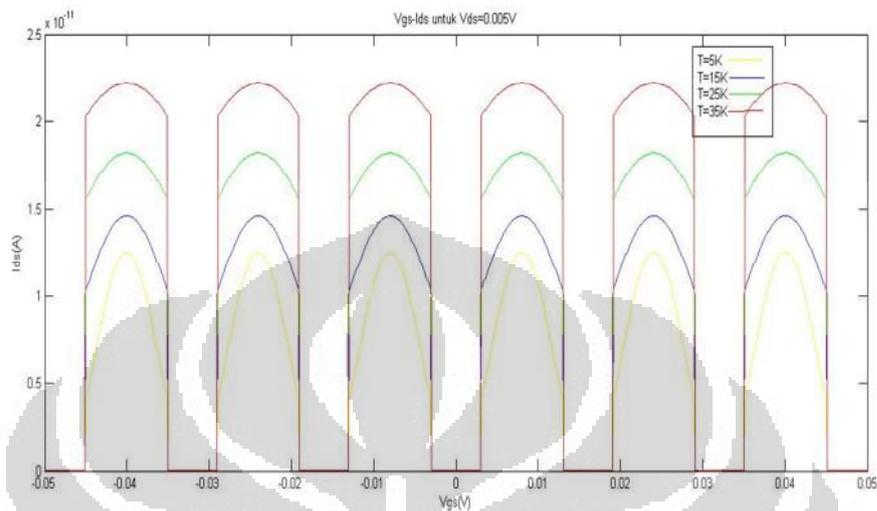
#### 4.2.2.1 Kondisi yang ada melewati Coulomb Blockade

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.13 bisa terlihat bahwa ketika suhu dinaikan maka besar arus yang dihasilkan pun akan naik tetapi bentuk gunungnya akan semakin landai. Bentuk gunung menjadi landai ini disebabkan oleh ketika suhu naik maka perpindahan elektron semakin cepat sehingga perubahan kenaikan arus menjadi lebih kecil untuk mencapai nilai maksimumnya.

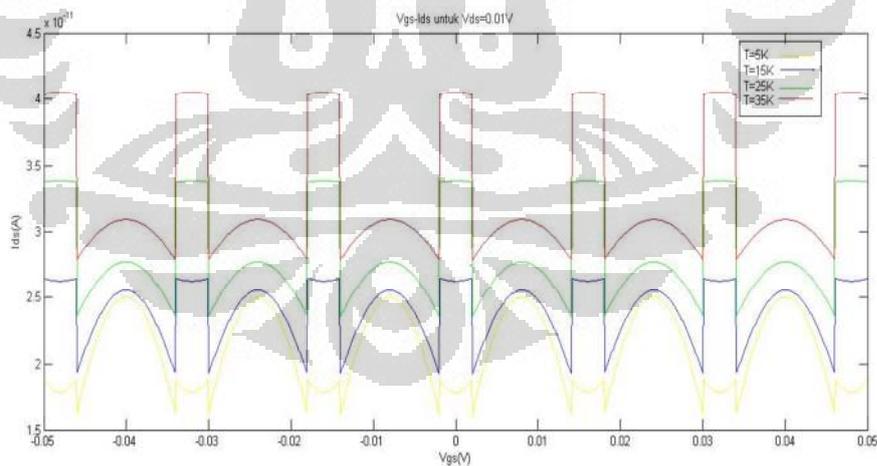
#### 4.2.2.2 Kondisi yang sama sekali tidak melewati Coulomb Blockade

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.14 bisa terlihat juga bahwa ketika suhu dinaikan maka besar arus yang dihasilkan pun akan naik. Akan tetapi pada kondisi ini bentuk gunungnya akan semakin landai dan bentuk yang sebelumnya lembah akan menjadi bentuk gunung yang besar arusnya lebih besar dari gunung sebelumnya. Bentuk gunung menjadi landai ini disebabkan oleh ketika suhu naik maka perpindahan elektron semakin cepat sehingga perubahan kenaikan arus menjadi lebih kecil untuk mencapai nilai maksimumnya. Sedangkan bentuk lembah yang

menjadi gunung lebih tinggi juga disebabkan oleh perpindahan elektron yang cepat sehingga besar energi yang dihasilkan akan tinggi.



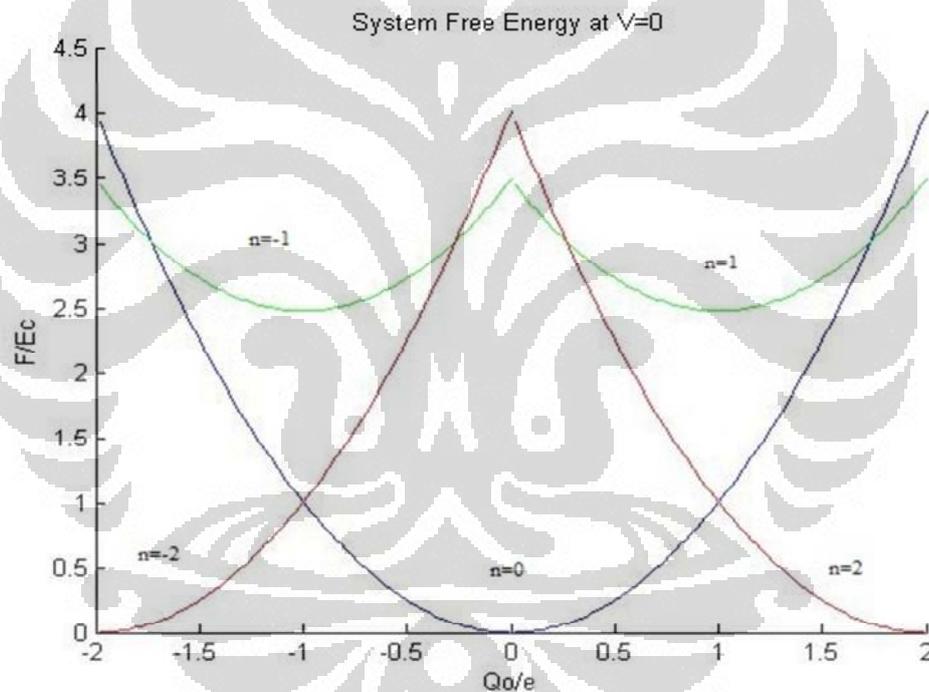
Gambar 4.13 Coulomb Oscillation untuk  $V_{ds} = 0.005$  V dengan 4 suhu yang berbeda



Gambar 4.14 Coulomb Oscillation untuk  $V_{ds} = 0.01$  V dengan 4 suhu yang berbeda

### 4.3 SET dengan Superconducting island

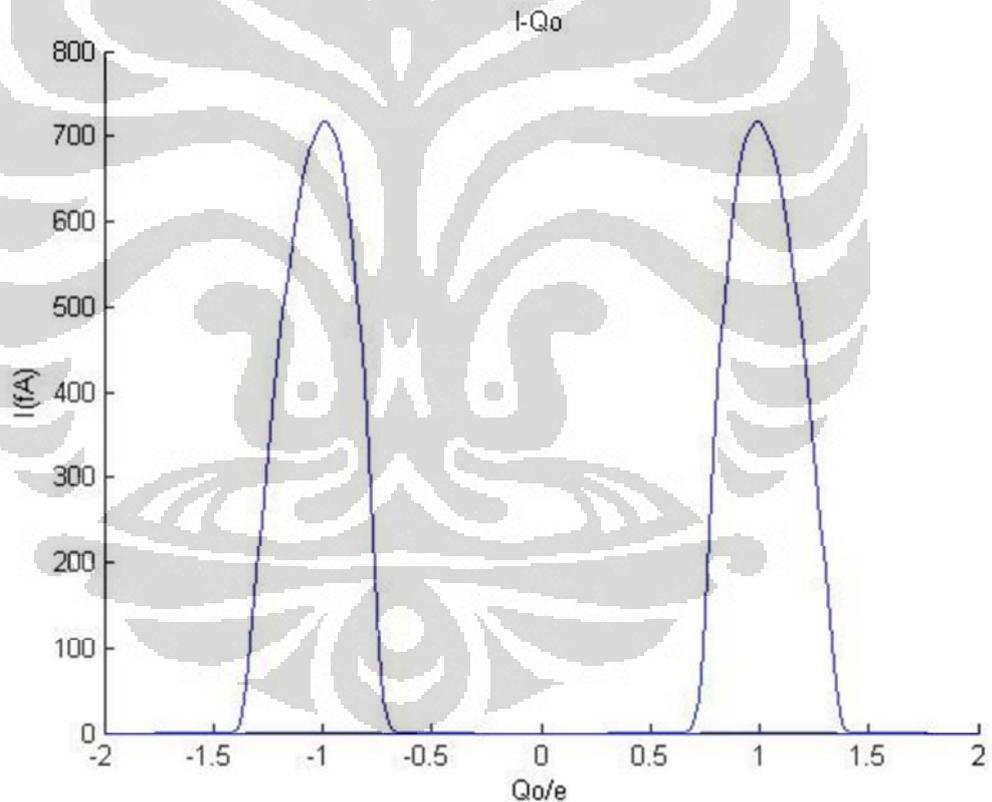
Ketika SET menggunakan *island* yang superkonduktif maka terjadi hal yang berbeda dari biasanya. Hal yang berbeda itu yaitu terjadi pasangan elektron yang mengakibatkan even-odd energy difference. Even-odd energy difference ini berdasarkan teori BCS. Bentuk system free energy yang dihasilkan bisa dilihat pada Gambar 4.15. Bentuk ini sedikit berbeda dengan diagram stabilitas SET biasa. Di sini ketika  $n$  atau jumlah elektron bernilai genap maka ada besar energi yang nol sedangkan untuk jumlah yang ganjil tidak ada yang bernilai nol. Hal ini akan mengakibatkan bentuk coulomb oscillation yang berbeda dengan SET biasa juga.



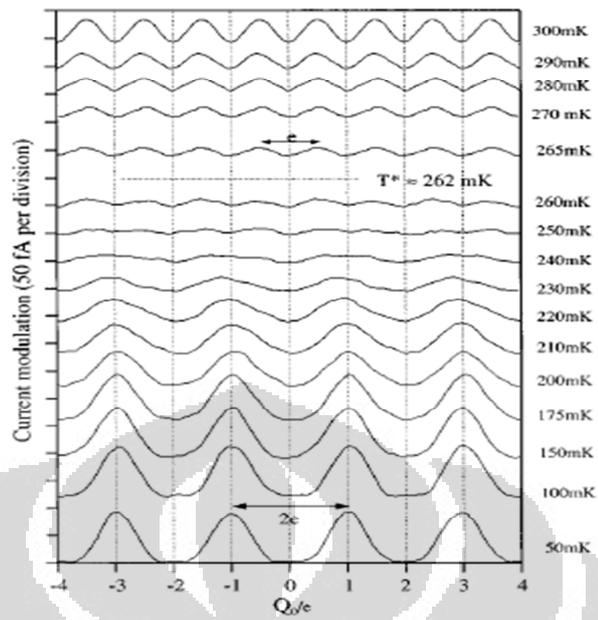
Gambar 4.15 System Free Energy at  $V_{ds} = 0$  V

Bentuk coulomb oscillation yang terjadi bisa dilihat pada Gambar 4.16. Gunung yang terjadi saat  $Q_0 = \pm e$  disebabkan oleh adanya Andreev reflection. Ketika suhu dinaikan maka bentuk coulomb oscillation yang dibentuk oleh superconducting island cukup menarik, dimana yang seharusnya

terjadi periode  $2e$  menjadi periode  $e$  saja. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 4.17. Hal ini disebabkan ketika suhu dinaikan maka besar gunung Andreev menurun sedangkan single electron tunneling menjadi lebih dominan. Pada Gambar 4.17 ada saat suhu tertentu dimana kondisi periode  $2e$  menjadi  $e$ . Besar suhu ini bisa dicari secara perhitungan yang ada pada teori walaupun pada praktikalnya akan sedikit berbeda. Perhitungan besar suhu yang menyebabkan perubahan kondisi tersebut menggunakan Persamaan (2.17). Besar suhu ini akan berbeda-beda tergantung superkonduktivitas yang digunakan karena setiap superkonduktivitas memiliki suhu kritis masing-masing sehingga memiliki energi gap yang berbeda-beda. Besar energi gap ini bisa dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.18).



4.16 Coulomb Oscillation  $2e$  periodic



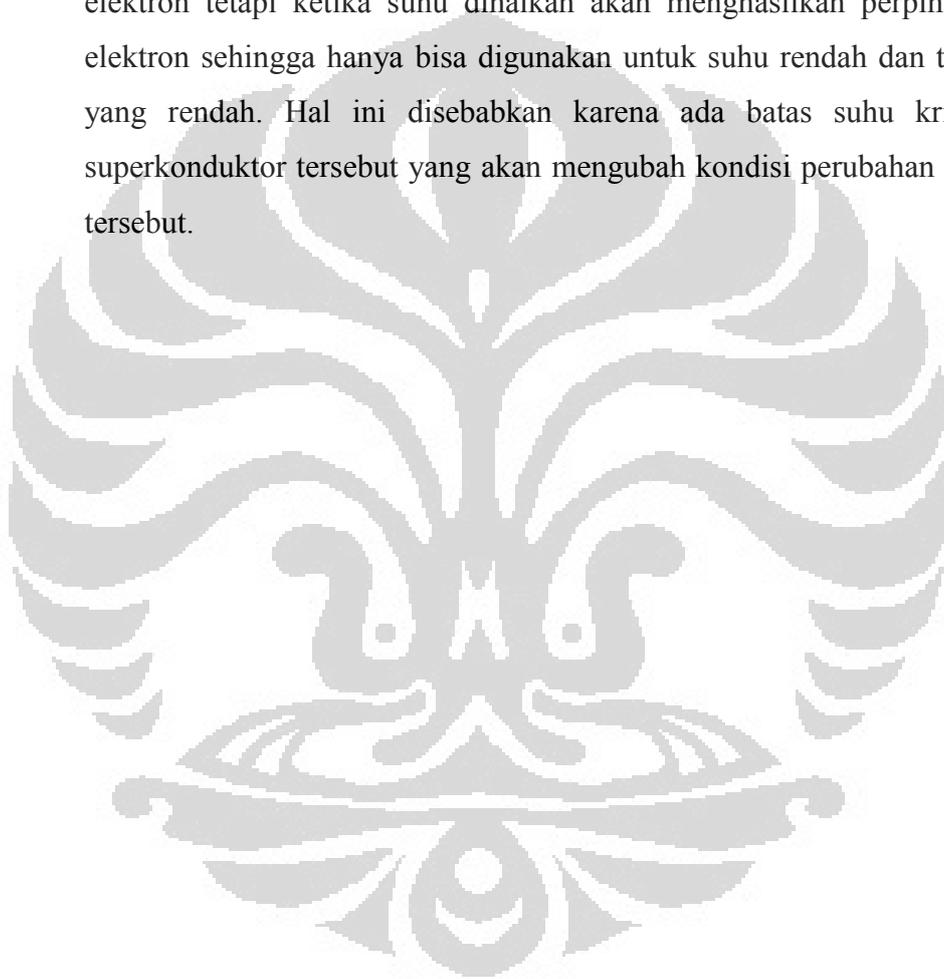
Gambar 4.17 I-Qo with low temperature  $2e$  periodic, high temperature  $e$  periodic [7]

## BAB 5. KESIMPULAN

Dari bab-bab sebelumnya, bisa ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Bentuk dan besar berlian termasuk *coulomb blockade* pada diagram stabilitas ditentukan oleh besar kapasitansi, *background charge*, dan tegangan yang digunakan.
2. Bentuk *coulomb oscillation* berbeda untuk 2 kondisi yaitu ada yang melewati *coulomb blockade* dan yang tidak berbeda.
3. Bentuk *coulomb oscillation* untuk kondisi ada yang melewati *coulomb blockade* akan menghasilkan bentuk gunung dan lembah, dimana bentuk gunung ditentukan oleh bagian *diamond* bukan *coulomb blockade* yang dilewati sedangkan bentuk lembah akan bernilai nol karena berada dalam *coulomb blockade*.
4. Bentuk *coulomb oscillation* untuk kondisi tidak ada yang melewati *coulomb blockade* akan menghasilkan bentuk gunung dan lembah, dimana bentuk lembah ini bisa berubah menjadi bentuk gunung juga tergantung perbandingan tinggi segitiga *diamond* atas dan bawah yang dilewati.
5. Salah satu hasil yang diperoleh dari simulasi yang dilakukan ini adalah dihasilkan puncak gunung sebesar 61.35 pA yang menggantikan lembah pada *coulomb oscillation* ketika menggunakan tegangan bias 0.0197 volt.
6. Perubahan bentuk lembah menjadi gunung terjadi ketika tinggi segitiga *diamond* atas lebih besar  $\approx 1.5$  kali dari tinggi segitiga *diamond* bawah yang dibentuk.
7. Kenaikan suhu akan menghasilkan arus yang meningkat juga. Hal ini ditunjukkan pada hasil *coulomb oscillation*. Akan tetapi ada suhu maksimal sesuai syarat terjadinya *coulomb blockade*.
8. Bentuk *coulomb oscillation* untuk kondisi ada yang melewati *coulomb blockade* ketika dinaikan suhunya yaitu bentuk gunung akan naik karena arus yang dihasilkan meningkat dan puncaknya akan semakin landai akibat suhu yang membuat perpindahan elektron menjadi cepat untuk sampai nilai maksimumnya.

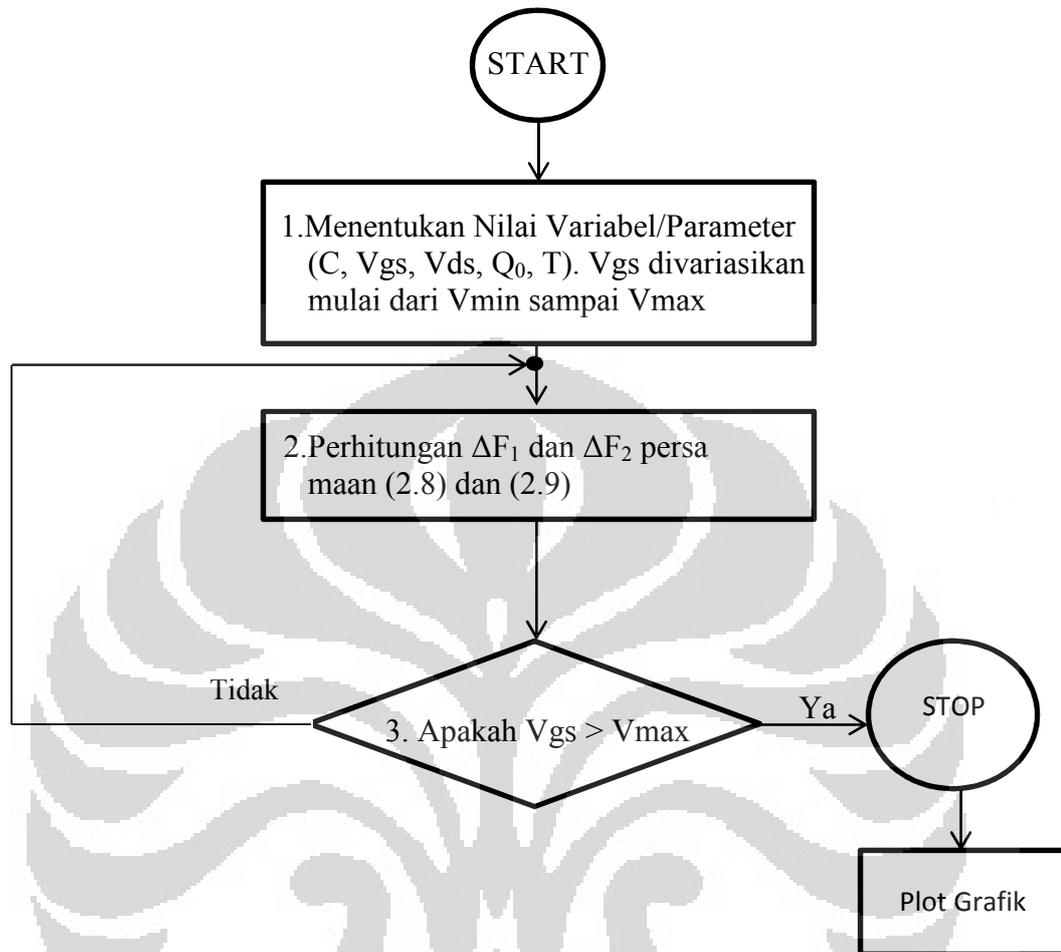
9. Bentuk *coulomb oscillation* untuk kondisi tidak ada yang melewati *coulomb blockade* ketika dinaikan suhunya yaitu bentuk gunung akan menjadi landai sedangkan bagian lembah akan semakin naik dan menjadi bentuk gunung yang lebih tinggi dari gunung yang berada di sebelahnya. Hal ini disebabkan suhu akan meningkatkan perpindahan elektron sehingga peningkatan arus ke nilai maksimumnya akan lebih cepat.
10. SET dengan *superconducting island* akan menghasilkan perpindahan 2 elektron tetapi ketika suhu dinaikan akan menghasilkan perpindahan 1 elektron sehingga hanya bisa digunakan untuk suhu rendah dan tegangan yang rendah. Hal ini disebabkan karena ada batas suhu kritis dari superkonduktor tersebut yang akan mengubah kondisi perubahan periodik tersebut.



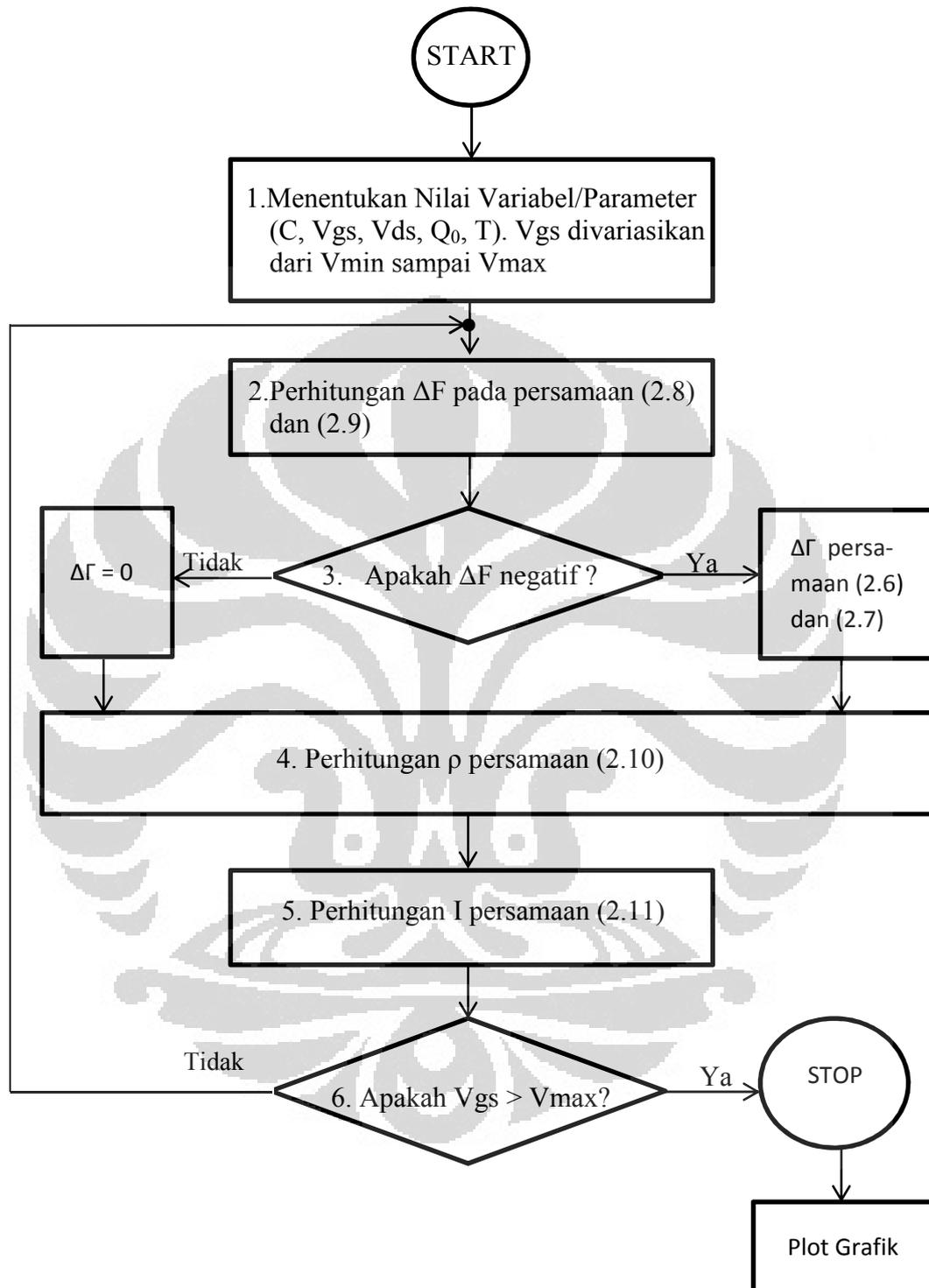
## DAFTAR REFERENSI

- [1] <http://www.wikipedia.org/electron>
- [2] Konstantin K. Likharev, "Single-Electron Devices and Their Applications," Proc. IEEE vol. 87, pp. 606-632 (1999)
- [3] Lee Jia Yen, Ahmad Radzi Mat Isa, Karsono Ahmad Dasuki (2005), "Modeling and simulation of single-electron transistors," <http://www.ibnusina.utm.my/jfs>
- [4] El-Sayed A. M. Hasaneen, Mohamed A. A. Wahab, Mohamed G. Ahmed, "New Analytical Model for Single Electron Transistor," OJEEE vol.2-no.4
- [5] Nuryadi, Ratno (2010). Lecture Nanoelectronic, Universitas Indonesia, Depok
- [6] J. M. Hergenrother, M. T. Tuominen, J. G. Lu, D.C. Ralph, and M. Tinkham, "Charge Transport and Photon-Assisted Tunneling in The NSN Single Electron Transistor," physical B 203 (1994) 327-339
- [7] J. G. Lu, J. M. Hergenrother, and M. Tinkham, "Parity effect in superconducting islands with increasing lengths," physical review B, Vol. 57, No. 1, 1 Januari 1998
- [8] <http://www.wikipedia.org/BCS-Theory>
- [9] Om Kumar and Manjit Kaur, "Single Electron Transistor: Applications & Problems," International journal of VLSI design & Communication Systems (VLSICS) Vol.1, No.4, December 2010
- [10] Khaedijeh Feizi, Saeed Haji Nasiri, "DC Characteristic Analysis of Single Electron Transistor based on MIB Model," 2010 International Conference on Nanotechnology and Biosensors IPCBEE vol.2 (2011) © (2011) IACSIT Press, Singapore

## Lampiran 1 : Algoritma Matlab Diagram Stabilitas



## Lampiran 2 : Algoritma Matlab Coulomb Oscillation



Lampiran 3 : Algoritma Matlab SET Superconducting Island

