



UNIVERSITAS INDONESIA

**OPTIMASI PERANCANGAN RANGKAIAN TERINTEGRASI
OPERATIONAL AMPLIFIER DUA TINGKAT
FREKUENSI RENDAH**

SKRIPSI

ARIF ISMAIL HUSIN

06 06 04 2304

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JULI, 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**OPTIMASI PERANCANGAN RANGKAIAN TERINTEGRASI
OPERATIONAL AMPLIFIER DUA TINGKAT
FREKUENSI RENDAH**

SKRIPSI

**Diajukan untuk melengkapi
sebagian persyaratan menjadi sarjana teknik**

ARIF ISMAIL HUSIN

06 06 04 2304

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JULI, 2009**

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Arif Ismail Husin
NPM : 06 06 04 2304
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Optimisasi Perancangan Rangkaian Terintegrasi
Operational Amplifier Dua Tingkat Frekuensi Rendah.

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.Ir.Agus Santoso Tamsir, M.T. (.....)

Penguji : Prof.Dr.Ir.Harry Sudibyo S.DEA (.....)

Penguji : Dr.Ir.Purnomo Sidi Priambodo, M.Sc. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Arif Ismail Husin

NPM : 0606042304

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan kepada Allah SWT atas segala Karunia dan Rahmat-Nya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk memperoleh gelar sarjana. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

- (1) Ibunda tercinta dan Almarhum Ayahanda yang telah membimbing dan memberi dukungan moril maupun materil
- (2) Dr.Ir.Agus Santoso Tamsir, MT, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (3) Umi Kulsum dan Taufiq Alief yang telah membantu baik tenaga maupun pikirannya dalam penyelesaian skripsi ini.
- (4) Teman-teman elektro khususnya ekstensi angkatan 2006 yang telah banyak membantu saya dalam penyelesaian skripsi ini.
- (5) Rekan-rekan Wartawan Telko, PT Lanskap Media Kreasi atas dukungannya selama ini.

Akhir kata, semoga Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu penyusunan skripsi ini dengan balasan yang lebih baik. Semoga skripsi ini membawa manfaat yang besar bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 7 Juli 2009

Penulis

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

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Arif Ismail Husin
NPM : 0606042304
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi perkembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :
Optimasi Perancangan Rangkaian Terintegrasi Operational Amplifier Dua Tingkat Frekuensi Rendah

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, 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 : 7 Juli 2009
Yang menyatakan

(Arif Ismail Husin)

ABSTRAK

Nama : Arif Ismail Husin
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Optimisasi Perancangan Rangkaian Terintegrasi *Operational Amplifier* Dua Tingkat Frekuensi Rendah

Slewrata merupakan salah satu parameter terpenting op-amp. Untuk mendeteksi pergeseran fasa, parameter *Slewrata* harus dilihat. Hal tersebut dikarenakan hubungan antara *Slewrata* dengan frekuensi akan menghasilkan akurasi yang digunakan untuk membaca keluaran. Untuk perancangan ini menggunakan rangkaian dua tingkat op-amp. Dalam rangkaian dua tingkat dihasilkan nilai *Slewrata* sebesar 20 V/ μ s. Nilai tersebut didapat dengan menggunakan teknologi 0.4 μ m untuk parameter MOS. Sehingga dengan merubah nilai *Capasitor Load* untuk tegangan masukkan V_{DD} 5 V dan 3.3 V. Dengan slewrata sebesar 20 V/ μ s didapati nilai lebar pulsa dengan akurasinya sebesar 0.7° untuk 5V dan 0.46° untuk 3.3 V. Hasil itu didapat untuk nilai *Capasitor Load* sebesar 1800 pF.

Kata kunci:

Slew Rate, Operational Amplifier Dua Tingkat

ABSTRACT

Name : Arif Ismail Husin
Study Program: Electrical Engineering
Title : Design Optimization of Two Stage Operational Amplifier
Integrated Circuit for Low Frequency

Slewrata is one of the most important parameter op-amp. To detecting the phase shift, the parameters should be seen Slewrata. That is because the relationship between the frequency Slewrata will producing accuracy that is used to read the output. For this design uses of two stage operational amplifier. In a circuit of two stage operational amplifier value generated Slewrata of $20 \text{ V} / \mu\text{s}$. Value is obtained by using $0.4 \mu\text{m}$ technology for the parameters of MOS. So with the value Capacitor Load to enter V_{DD} voltage 5 V and 3.3 V . With slewrata of $20 \text{ V} / \mu\text{s}$ founded bandwidth with the accuracy of 0.7° for 5V and 0.46° to 3.3 V . Results are obtained for the values of Capacitor Load 1800 pF .

key words:
Slew Rate, Two Stage Operational Amplifier

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar belakang	1
1.2 Tujuan	2
1.2 Batasan Masalah	2
1.3 Sistematika Penulisan	3
1.4 Metode Penulisan Skripsi	3
2. LANDASAN TEORI	
2.1 <i>Operational Amplifier</i>	5
2.1.1. Pengertian Dasar	5
2.1.2. Karakteristik <i>Operational Amplifier</i>	6
2.1.2.1. Penguatan Loop Terbuka (<i>Open Loop</i>)	6
2.1.2.2. CMRR	7
2.1.2.3. Tegangan <i>Offset</i>	8
2.1.2.4. Arus Bias <i>Input</i>	9
2.1.2.5. Impedansi <i>Input</i>	9
2.1.2.6. Impedansi <i>Output</i>	10
2.1.2.7. Arus <i>Offset Input</i>	10
2.1.2.8. <i>Slew Rate</i>	11
2.1.2.9. Lebar Pita (<i>Bandwidth / BW</i>)	12
2.1.2.10. Karakteristik Tidak Berubah Dengan Suhu	12
2.2 MOS	12
2.2.1 Karakteristik MOS	14
3. METODE PERANCANGAN RANGKAIAN PENGUAT OPERASI FREKUENSI RENDAH	
3.1 Dasar Perancangan	17
3.2 Parameter MOS	19
3.3 Parameter <i>Operational Amplifier</i>	24
3.4 Perancangan Rangkaian Penguat Operasi Dua Tingkat Frekuensi Rendah	26
3.4.1. <i>Capasitor Load</i> (C_L)	27
3.4.2. <i>Slewrates</i>	27
3.4.3 <i>Gain Bandwidth</i> (<i>GBW</i>)	28

3.4.4. V_{DD} dan V_{SS}	28
3.4.5. g_{m6}	28
3.4.6. S_7	29
3.5. Proses Simulasi Rangkaian	30
4. KAJIAN PERHITUNGAN DAN ANALISA RANGKAIAN PENGUAT OPERASI FREKUENSI RENDAH	
4.1 Kajian Penentuan Parameter MOS.....	32
4.2 Analisa Data	46
5. PENUTUP	
6.1 KESIMPULAN	48
6.2 SARAN	48
DAFTAR ACUAN	50
DAFTAR REFERENSI	51
LAMPIRAN	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter <i>Operational Amplifier</i>	7
Tabel 3.1	Akurasi <i>Slewrata</i> Terhadap Frekuensi	16
Tabel 3.2	Untung Rugi Rangkaian Op-amp.....	18
Tabel 3.3	Mobilitas unsur untuk doping semikonduktor	19
Tabel 3.4	Parameter MOS 0.4 μ m	21
Tabel 4.1	Parameter CMOS yang digunakan.....	29
Tabel 4.2	Parameter Masukkan yang digunakan	30
Tabel 4.3	Keluaran untuk V_{DD}/V_{SS} 5 V dan C_L 1800pF	35
Tabel 4.4	Parameter masukkan yang digunakan.....	37
Tabel 4.5	Keluaran untuk V_{DD}/V_{SS} 3.3 V dan C_L 1800pF	37
Tabel 4.6	Kurva perubahan <i>Slewrata</i> pada Frekuensi.....	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Simbol Operational Amplifier.....	4
Gambar 2.2	Penguatan differensial.....	5
Gambar 2.3	Blok diagram Operational Amplifier.....	6
Gambar 2.4	Jenis MOS.....	14
Gambar 3.1	Kurva Perbandingan <i>Slewrata</i> dan FPBW	15
Gambar 3.2	Blok diagram untuk perinsip dasar perancangan	17
Gambar 3.3	Total impurity concentration trhadap mobility	19
Gambar 3.4	Rangkaian Operational Amplifier dua tingkat	22
Gambar 3.5	Perancangan Masukkan dan keluaran	22
Gambar 3.6	parameter Operational Amplifier dua tingkat	24
Gambar 3.7	rangkaian Operational Amplifier Dua tingkat dengan kompensasi miller	27
Gambar 4.1	Perubahan S1 terhadap <i>Slewrata</i> dan CL	31
Gambar 4.2	Perubahan S3 terhadap <i>Slewrata</i> dan CL	31
Gambar 4.3	Perubahan S5 terhadap <i>Slewrata</i> dan CL	32
Gambar 4.4	Perubahan S7 terhadap <i>Slewrata</i> dan CL	33
Gambar 4.5	Perubahan V_{DS5} terhadap <i>Slewrata</i> dan CL.....	33
Gambar 4.6	Perubahan S6 terhadap <i>Slewrata</i> dan CL	34
Gambar 4.7	Perubahan A_V terhadap <i>Slewrata</i> dan CL	34
Gambar 4.8	Perubahan Disipasi Daya terhadap <i>Slewrata</i> dan CL.....	35
Gambar 4.9	Perubahan I_5 terhadap <i>Slewrata</i> dan CL	36
Gambar 4.10	Hubungan perubahan CL terhadap Disipasi Daya	38
Gambar 4.11	Hubungan Perubahan CL Terhadap Besaran S	38
Gambar 4.12	Hubungan perubahan <i>Slewrata</i> terhadap disipasi daya	39
Gambar 4.13	Hubungan perubahan <i>Slewrata</i> terhadap S	39
Gambar 4.14	Hubungan Perubahan <i>Slewrata</i> terhadap AV	40
Gambar 4.15(a)	Hasil diagram bode	41
Gambar 4.15(b)	Hasil Respons sistem	41
Gambar 4.16	Kurva Perbandingan <i>Slewrata</i> dan FPBW	42

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Keluaran <i>Operational Amplifier</i> 5V.....	49
Lampiran B	Keluaran <i>Operational Amplifier</i> 3.3V	57
Lampiran C	Hasil Perhitungan.....	62



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Sejak ditemukannya bahan baku semikonduktor pada tahun 1947 oleh John Bardeen dan Walter Brattain[3], bagi dunia elektronik menjadi begitu penting. Dengan bahan baku Semikonduktor perancangan transistor yang pada awalnya menggunakan tabung kini dapat diubah menjadi sebuah komponen kecil

Dewasa ini bahan baku semikonduktor dapat membuat sebuah komponen yang di dalamnya terdapat rangkaian terintegrasi, atau lebih dikenal dengan istilah IC (*Integrated Circuit*).

Dalam sebuah perancangan IC diperlukan rangkaian elektronik yang menggunakan bahan baku semikonduktor, baik itu Silicon (Si) ataupun Germanium (Ge). Pemilihan bahan baku semikonduktor akan berpengaruh terhadap karakteristik dari IC tersebut. Saat ini hampir semua IC menggunakan semikonduktor dari bahan silicon.[1]

Biasanya didalam IC terdapat komponen elektronik yang berbahan semikonduktor, seperti Transistor. Didalam komponen transistor terdapat elektron dan *Hole* yang saling mengikat. Untuk menentukan tipe dari transistor diperlukan manipulasi elektron dan *Hole*. Kelebihan *Hole* akan mengakibatkan semikonduktor itu disebut tipe-p, sedangkan kelebihan elektron akan disebut tipe-n.

Komponen-komponen semikonduktor yang banyak dikenal dengan BJT (Bipolar Junction Transistor), JFET (Junction Gate Field Effect Transistor), MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) dan lain sebagainya akan membentuk sebuah rangkaian terintegrasi jika salah satu jenisnya di kumpulkan. Salah satunya adalah pada Op-Amp.

Didalam komponen Op-Amp (*Operational Amplifier*) umumnya terdapat dua buah komponen transistor yang memiliki dua buah masukan dengan satu keluaran, dimana transistor tersebut mendapatkan tegangan masukan. Op-Amp dapat berfungsi sebagai penguatan inverting, penguatan non-inverting, filter,

integrator dan differensiator. Disetiap fungsi Op-Amp dapat ditentukan hasil keluaran yang diharapkan, sehingga untuk mengoptimisasi keluaran Op-Amp harus melihat dari karakteristik Op-Amp itu sendiri.

Sebagai contoh dalam pergeseran fasa, dalam karakteristik Op-Amp yang digunakan untuk pergeseran fasa didapat sebuah parameter yang disebut *Slewrate*. *Slewrate* dapat menyebabkan tingkat keakurasian perubahan tegangan keluaran pada perioda tertentu.

Slewrate yang besar tidak dapat dimiliki oleh semua Op-Amp, sebab setiap Op-Amp dirancang dengan memiliki fungsinya masing-masing. Jika ingin merancang Op-Amp dengan tingkat penguatan yang besar maka nilai *Slewrate* akan kecil, tetapi jika menginginkan sebuah Op-Amp dengan kecepatan tinggi maka nilai *Slewrate* akan semakin besar.

Telescopic, Folded, Two stage, Gain Boosted, adalah jenis-jenis rangkaian dalam dari sebuah Op-Amp yang memiliki keunggulan dan kelemahan dari masing-masing rangkaian. Pada Skripsi kali ini *Two Stage Operational Amplifier* digunakan untuk merancang sebuah Op-Amp. Pada perancangan *Two Stage Operational Amplifier* akan menghasilkan keluaran dengan *Gain* tinggi, *swing output* sangat tinggi, rendah *noise*, dan menghasilkan *Speed* yang rendah.

1.2 TUJUAN

Tujuan dari perancangan *Operational Amplifier* adalah untuk dicapainya *Operational Amplifier* yang dapat bekerja pada frekuensi rendah, yaitu 30 KHz. Frekuensi tersebut digunakan untuk membaca sensor dengan melihat pergeseran fasa antara tegangan masukan dan tegangan keluaran. Sehingga dengan frekuensi kerja 30 KHz didapatkan nilai *Slewrate* dalam *Operational Amplifier* dua tingkat mencapai menjadi maksimal. Nilai *Slewrate* yang maksimal akan menghasilkan tingkat ketelitian yang tinggi untuk membaca perubahan tegangan keluaran pada perioda tertentu

1.3 BATASAN MASALAH

Perancangan *Operational Amplifier* menggunakan rangkaian yang berjenis dua tingkat. Dengan menggunakan berbagai persamaan yang mengacu pada

syarat, maka didapatkan sebuah hasil perhitungan yang diinginkan dengan menggunakan *Microsoft Excel* untuk mempermudah pencarian hasilnya. Setelah itu, dicari tingkat kestabilannya dengan menggunakan *Mathlab 7.1*.

1.4 METODOLOGI Pengerjaan

Metode yang digunakan yaitu, menentukan besaran dari parameter-parameter yang diperlukan untuk merancang sebuah *Operational Amplifier* dua tingkat dengan menentukan parameter bebas dan parameter tetap. Parameter bebas adalah parameter yang nilainya dapat diubah-ubah. Dalam hal ini parameter yang diubah adalah nilai *Slewrates* dari 10 V/ μ s hingga 100 V/ μ s, Nilai Kapasitor *Load* dari 800 pF sampai 2900 pF dengan tegangan masukkan sebesar 3.3 V dan 5V. Sedangkan parameter tetap adalah parameter MOS yang meliputi λ_p , λ_n , t_{OX} , μ_n , μ_p , N_A , N_D , K_N , K_P dan yang terakhir adalah *Gain Bandwidth*.

Selanjutnya, dari parameter tersebut dapat ditentukan besaran *Slewrates*, A_V , dan $S(W/L)$ yang mengacu pada kemungkinan - kemungkinan yang bisa diambil dengan mengacu pada beberapa syarat, seperti: nilai S lebih besar dari 1, V_{DS5} lebih besar dari 100 mV dan *Gain* harus lebih besar dari 5000 V/V. .

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Adapun sistematika yang digunakan dalam penyusunan seminar ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi pengerjaan dan sistematika

BAB II LANDASAN TEORI

Berisi tentang Teori-Teori *Operational Amplifier*, karakteristik MOS untuk perancangan

BAB III METODE PERANCANGAN RANGKAIAN PENGUAT OPERASI DUA TINGKAT FREKUENSI RENDAH

Berisi tentang metode –metode yang dilakukan saat perancangan IC OpAmp

**BAB IV KAJIAN PERHITUNGAN DAN ANALISA PANGKAIAN
PENGUAT DUA TINGKAT FREKUENSI RENDAH**

Berisi pengujian hasil perhitungan yang dilakukan saat merancang dan dianalisa berdasarkan teori-teori penunjang

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang berasal dari analisa.

BAB 2

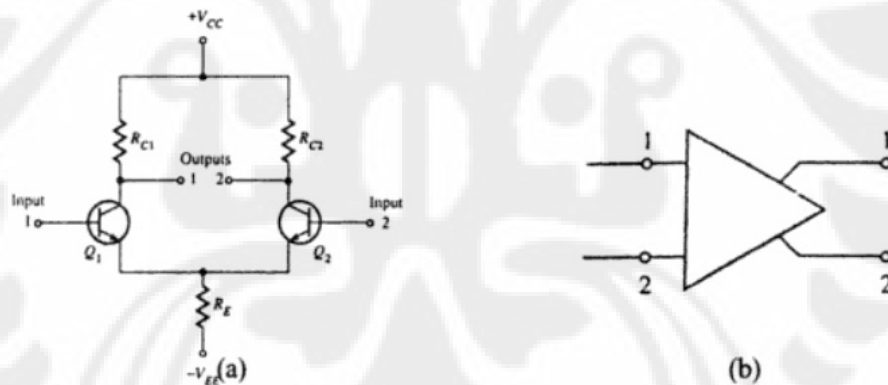
LANDASAN TEORI

2.1 Operational Amplifier

Penguat operasi (*Operational Amplifier*) atau sering disingkat dengan Op-Amp yaitu komponen elektronika yang merupakan suatu rangkaian *integrated circuit*. Rangkaian dasar opamp terdiri dari suatu rangkaian *differential amplifier*[3]

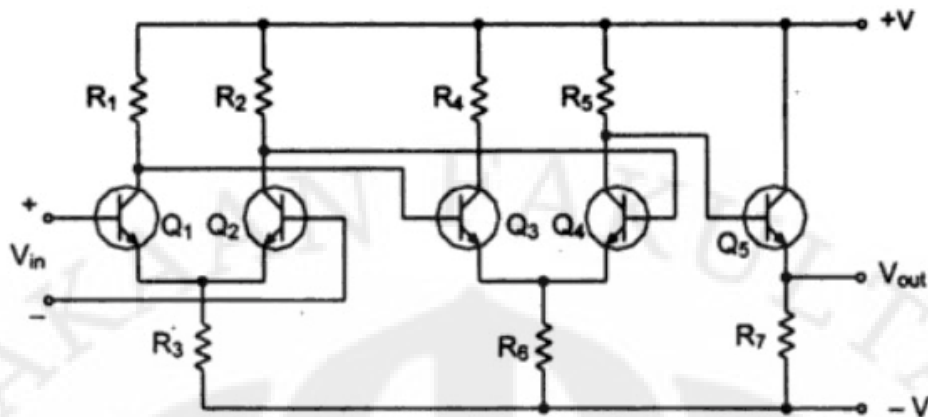
2.1.1 Pengertian Dasar

Op-Amp adalah komponen elektronika yang merupakan suatu rangkaian *integrated circuit*. Rangkaian dasar Op-Amp terdiri dari suatu rangkaian *differential amplifier*. Salah satu contoh sederhana rangkaian *differential amplifier*. Seperti pada gambar 2.1a, dan simbolnya seperti pada gambar 2.1b.



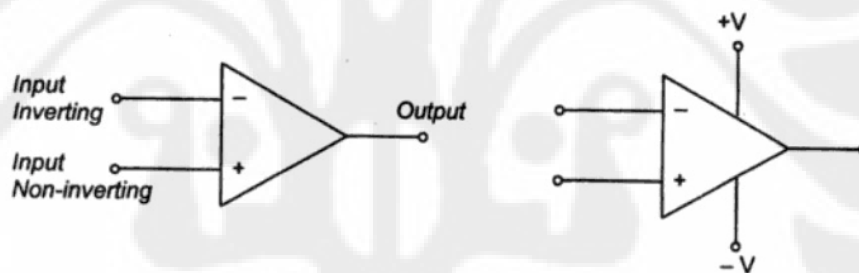
Gambar 2.1. *Differential Amplifier*[3]

Pada Op-Amp terdapat lebih dari satu rangkaian *differential amplifier*. Salah satu contoh rangkaian sederhana *operational amplifier* seperti pada gambar 2.2 yang terdiri atas dua tingkat rangkaian *differential amplifier*, dan pada *output* terdapat rangkaian *emitter follower*.



Gambar 2.2. Rangkaian sederhana Op-Amp[3]

Pada Op-Amp terdapat 2 *input* yang merupakan *input* dari *differential amplifier* tingkat ke-1 dan sebuah *output*. *Input-input* dari Op-Amp, yaitu *inverting input* (-) dan *non-inverting input*(+). Seperti yang terlihat pada gambar 2.3 sebagai simbol dari Op-Amp.



Gambar 2.3. Simbol Op-Amp[3]

2.1.2 Karakteristik *Operational Amplifier*

2.1.2.1. Penguatan loop terbuka (*open loop*)

Penguatan loop terbuka dari suatu Op-Amp adalah penguatan pada *output* Op-Amp tanpa adanya umpan balik (*Feedback*) dari *output* ke salah satu *input*, Karena op-amp terdiri dari beberapa tingkat penguatan *differential amplifier* dan penguat lainnya pada tahap akhir rangkaian Op-amp. Sehingga dengan sendirinya penguatan akhir pada *output* Op-amp sangat tinggi. Idealnya, penguatan loop terbuka Op-amp adalah tak terhingga ($=\infty$). Sesuai keterbatasan terhadap karakteristik komponen. Maka pada umumnya penguatan berkisar antara 50.000 s/d 200.000 Volt/Volt

2.1.2.2. CMRR

CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) merupakan parameter yang cukup penting untuk menunjukkan kinerja op-amp tersebut. Op-amp dasarnya adalah penguat diferensial dan mestinya tegangan *input* yang dikuatkan hanyalah selisih tegangan antara *input non-inverting* dengan *input inverting*. Karena ketidak-idealan op-amp, maka tegangan persamaan dari kedua *input* ini ikut juga dikuatkan. CMRR yang makin besar maka Op-Amp diharapkan akan dapat menekan penguatan sinyal yang tidak diinginkan (*common mode*) sekecil-kecilnya.

Common mode input adalah kondisi di mana pada kedua *input* Op-Amp diberi sinyal yang sama besar dan juga polaritas yang sama (se-fasa)[3]. Jika kedua pin *input* dihubung singkat dan diberi tegangan, maka *output* Op-Amp dapat menghasilkan nol (=0). Dengan kata lain, dalam sebuah Op-Amp dengan memiliki nilai CMRR yang semakin besar akan menghasilkan Op-amp yang semakin baik.[11]

Seperti pada *differential amplifier*, maka pada Op-amp pun terjadi hal yang sama pada kondisi *common-mode input*. CMRR pada Op-Amp didefinikan:

$$\text{CMRR} = \frac{A_{OL}}{A_{CM}} \quad (2.1)$$

Dimana :

A_{OL} = Penguatan loop terbuka pada *output* opamp

A_{cm} = penguatan pada *output* Opamp dengan kondisi *common mode input*

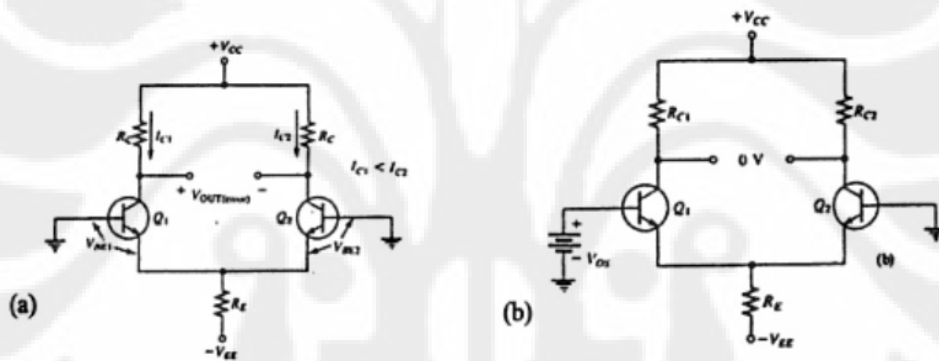
Biasanya CMRR pada data sheet dinyatakan dalam desibel, sehingga persamaannya menjadi:

$$\text{CMRR(dB)} = 20 \log \left[\frac{A_{OL}}{A_{CM}} \right] \quad (2.2)$$

Berdasarkan persamaan diatas maka didapat Nilai CMRR dalam sebuah Op-Amp yang berada dipasaran berkisar antara 90 dB s/d 130 dB[3]

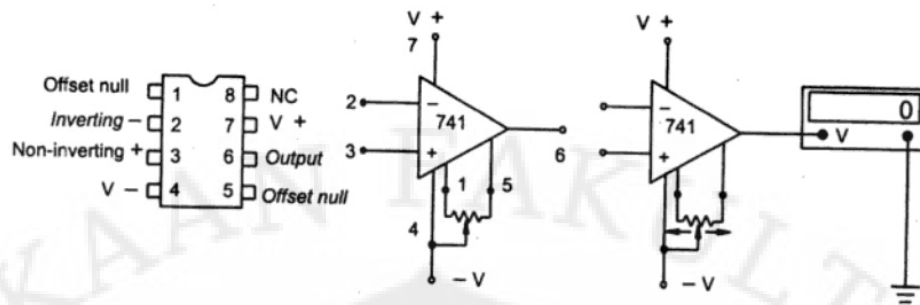
2.1.2.3. Tegangan Offset.

Akibat ketidak-samaan transistor Q1 dan Q2 pada *differential amplifier* yang merupakan bagian dari Op-Amp maka akan menyebabkan terjadinya tegangan *offset*. Tegangan *Offset* yaitu timbulnya tegangan DC pada *output*, meskipun dari *input* tidak ada sinyal, atau *input* di ketanahkan (*Ground*) seperti pada gambar 2.4a. hal ini disebabkan tidak samanya arus kolektor pada Q1 dan Q2. misalnya $I_{C1} < I_{C2}$, diakibatkan dari perbedaan tegangan pada basisnya ($V_{BE1} > V_{BE2}$). Hal ini menimbulkan tegangan dc pada *output* dimana $V_{out} = I_{C1} \cdot R_C - I_{C2} \cdot R_C$. Tegangan DC *error* ini disebut dengan tegangan *offset*.



Gambar 2.4. Tegangan Offset Op-Amp[3]

Untuk menghindari tegangan *offset* pada *output*, pada salah satu *input* biasanya diberi tambahan tegangan dc, yaitu $V_{OS} = V_{BE1} - V_{BE2}$ yang menyebabkan $V_{out} = 0$. Penambahan tegangan pada salah satu *input* untuk menghilangkan terjadinya tegangan *offset* pada *output* disebut *offset input* (V_{OS}). Nilai tipikal tegangan *offset input* dari suatu Op-Amp kira-kira 2mV[3]. Biasanya pada setiap komponen opamp selalu diberikan kompensasi sebagai tegangan offset *input* yang dapat diatur, dan untuk menghasilkan tegangan offset pada *output* = 0 seperti terlihat pada gambar 2.5 dengan contoh komponen 741.



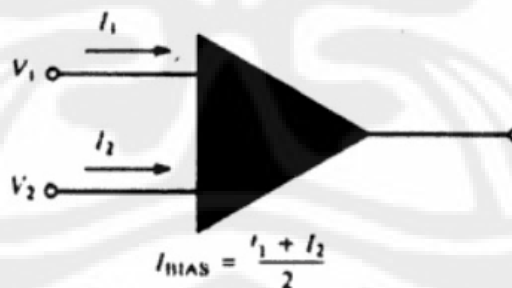
Gambar 2.5. Op-Amp 741[3]

Tegangan *offset input* akan berubah sesuai dengan perubahan temperatur yang terjadi pada Op-amp. Nilai tipikal untuk perubahan tegangan *offset input* akibat perubahan temperatur adalah sekitar $5\text{mV}/^{\circ}\text{C} - 50\text{uV}/^{\circ}\text{C}$ [3].

2.1.2.4. Arus bias *Input*

Arus bias *input* didefinisikan sebagai arus rata-rata yang berasal dari Input Inverting dan Input Non-Inverting. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 2.6

$$I_{\text{Bias}} = \frac{(I_1 + I_2)}{2} \quad (2.3)$$



Gambar 2.6. Arus Bias Op-Amp[3]

2.1.2.5. Impedansi *Input*

Idealnya, Impedansi *Input* Opamp tak terhingga. Sesuai dengan keterbatasan karakteristik komponen Op-Amp, maka nilai tipikal impedansi *input* Op-amp sekitar 2 Mohm s/d 100 Mohm, tetapi nilai Impedansi *input* tergantung dari jenis Op-Amp. Nilai impedansi *input* biasanya diukur pada kondisi tanpa

umpan balik. Apabila suatu umpan balik negatif (*negative feedback*) diterapkan, maka hambatan masukan *operational amplifier* akan meningkat.

Dalam suatu penguat, hambatan masukan yang besar adalah suatu hal yang diharapkan. Semakin besar hambatan masukan suatu penguat, maka semakin baik penguat tersebut dalam menguatkan sinyal yang amplitudonya sangat kecil. Dengan hambatan masukan yang besar, maka sumber sinyal masukan tidak terbebani terlalu besar.

2.1.2.6. Impedansi Output

Idealnya impedansi *Output* adalah 0 (nol), tetapi sesuai dengan keterbatasan karakteristik komponen, maka umumnya nilai tipikal untuk impedansi *output* Op-Amp adalah <100 ohm. Dalam kondisi praktis harga hambatan keluaran *operational amplifier* adalah antara beberapa ohm hingga ratusan ohm pada kondisi tanpa umpan balik. Dengan diterapkannya umpan balik, maka harga hambatan keluaran akan menurun hingga mendekati kondisi ideal

2.1.2.7. Arus Offset Input

Arus *Offset Input* didefinisikan dengan perbedaan arus masukan pada *inverting* dan masukan *non-inverting*. Arus Offset Input tertuang pada persamaan 2.4.

$$I_{OS} = [I_1 - I_2] \quad (2.4)$$

Jika

$$V_{out} = I_1 \cdot R_{in} - I_2 R_{in} \quad (2.5)$$

$$= (I_1 - I_2) R_{in} \quad (2.6)$$

$$= I_{OS} R_{in} \quad (2.7)$$

Dan

A_V = Penguatan loop terbuka Op-amp.

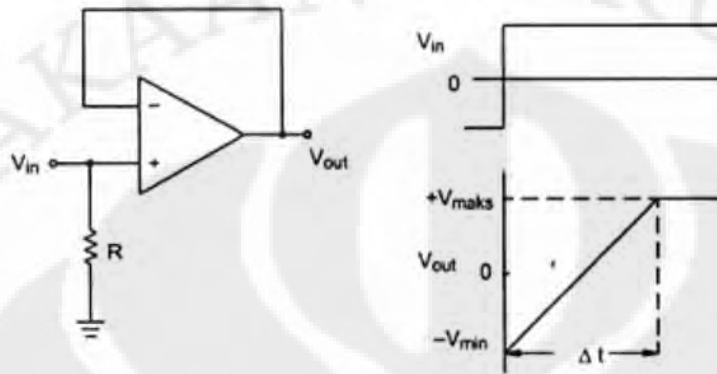
Maka tegangan *Offset* pada *Output*:

$$V_{Out} = A_V I_{OS} R_{in} \quad (2.8)$$

Nilai tipikal arus *offset input* adalah dalam orde: nano ampere (nA)

2.1.2.8. Slew Rate

Slew rate didefinisikan sebagai kecepatan maksimum perubahan tegangan *output* terhadap respon tegangan *input* dc (step *input* voltage) yang diberikan. Cara pengukuran *slew rate* seperti pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. Grafik Pengukuran *Slewrate*[3]

$$\text{Slew rate (SR)} = \Delta V_{out} / \Delta t \quad (2.9)$$

$$\text{Dimana: } \Delta V_{out} = +V_{maks} - (-V_{maks}) \quad (2.10)$$

Sebagai ilustrasi, di bawah ini diberikan table (tabel 2.1) berisi nilai karakteristik-karakteristik Op-amp untuk beberapa tipe (semua parameter diukur pada temperatur 25°C)[3].

Tabel 2.1. Parameter beberapa Op-Amp[3]

Parameter	Tipe Op-Amp			
	741	LM101A	LM108	LM218
Tegangan <i>Offset Input</i>	1 mV	1 mV	0.7mV	2mV
Arus <i>Bias Input</i>	80 nA	120 nA	0.8 nA	120 nA
Arus <i>Offset Input</i>	20 nA	40 nA	0.05 nA	6 nA
Impedansi <i>Input</i>	2 M Ω	800 k Ω	70 M Ω	3 M Ω
Impedansi <i>Output</i>	75 Ω	-	-	-
Penguatan Loop Terbuka	200.000	160.000	300.000	200.000
<i>Slewrate</i>	0.5 V/ μ s	-	-	-
CMRR	90 dB	90 dB	100 dB	100 dB

2.1.2.9. Lebar pita (*Band Width / BW*)

Sebagian besar *operational amplifier* serba guna memiliki lebar pita hingga 1 MHz dan biasanya diterapkan pada sinyal dengan frekuensi beberapa kiloHertz, tetapi ada juga yang khusus dirancang untuk bekerja pada frekuensi tinggi (MegaHertz). *Operational amplifier* jenis ini juga harus didukung komponen eksternal yang dapat mengkompensasi frekuensi tinggi agar dapat bekerja dengan baik.

2.1.2.10. Karakteristik tidak berubah dengan suhu

Sebagai mana diketahui, suatu bahan semikonduktor yang akan berubah karakteristiknya apabila terjadi perubahan suhu yang cukup besar. Pada *operational amplifier* yang ideal, karakteristiknya tidak berubah terhadap perubahan suhu. Tetapi dalam prakteknya, karakteristik sebuah *operational amplifier* pada umumnya sedikit berubah, walaupun pada penerapan biasa, perubahan tersebut dapat diabaikan.[11]

Salah satu contoh *operational amplifier* yang digunakan sebagai *komparator* dalam membuat rangkaian elektronika adalah LT1806/LT807. LT1806/LT807 adalah *single/dual low noise rail-to-rail input dan output*, mempunyai *Gain-bandwidth* sebesar 325MHz, waktu tanggapan (*slew rate*) sebesar 140V/ μ s dan mempunyai arus keluaran 85 mA. *Operational amplifier* ini optimal digunakan untuk tegangan rendah dan mempunyai sistem pengkondisian sinyal dengan performansi tinggi.

2.2 MOS

Complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS) atau semikonduktor–oksida–logam komplementer, adalah sebuah jenis utama dari rangkaian terintegrasi. Teknologi MOS digunakan di mikroprosesor, pengontrol mikro, RAM statis, dan sirkuit logika digital lainnya. Teknologi CMOS juga digunakan dalam banyak sirkuit analog, seperti sensor gambar, pengubah data, dan trimancar terintegrasi untuk berbagai jenis komunikasi. Frank Wanlass berhasil mematenkan CMOS pada tahun 1967 (US Patent 3,356,858).

CMOS juga sering disebut *complementary-symmetry metal-oxide-semiconductor* or *COSMOS* (semikonduktor-logam-oksida komplementer-simetris). Kata komplementer-simetris merujuk pada kenyataan bahwa biasanya desain digital berbasis CMOS menggunakan pasangan komplementer dan simetris dari MOSFET semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n untuk fungsi logika.

Dua karakter penting dari CMOS adalah ketebalan desahnya yang tinggi dan penggunaan daya statis yang rendah. Daya hanya diambil saat transistor dalam CMOS berpindah antara kondisi hidup dan mati. Akibatnya, peranti CMOS tidak menimbulkan bahang sebanyak sirkuit logika lainnya, seperti logika transistor-transistor (TTL) atau logika NMOS, yang hanya menggunakan peranti tipe-n tanpa tipe-p. CMOS juga memungkinkan chip logika dengan kepadatan tinggi dibuat.

Kalimat "metal-oxide-semiconductor" atau semikonduktor-logam-oksida adalah sebuah sebutan pada struktur fisik beberapa transistor efek medan, memiliki gerbang elektroda logam yang terletak diatas isolator oksida logam, yang juga berada diatas bahan semikonduktor. Aluminium digunakan pertama kali, tetapi sekarang digunakan bahan polisilikon. Gerbang logam lain dibuat seiring kedatangan material dielektrik permitivitas tinggi didalam proses pembuatan CMOS, seperti yang diumumkan oleh IBM dan Intel untuk node 45 nanometer dan lebih kecil ^[1].

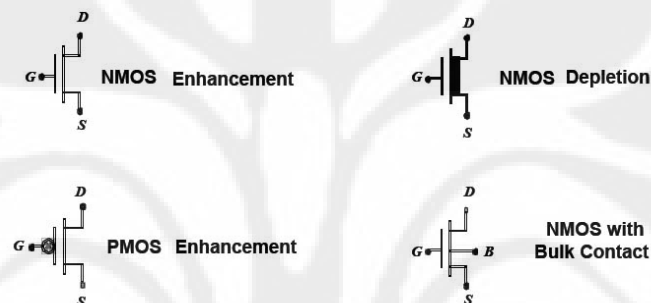
"CMOS" merujuk pada desain sirkuit digital tertentu, dan proses-proses yang digunakan untuk mengimplementasikan sirkuit tersebut dalam rangkaian terintegrasi. Sirkuit CMOS memboroskan lebih sedikit daya saat statis, dan memungkinkan penempatan sirkuit yang lebih padat daripada teknologi lain yang mempunyai fungsi sama. Saat keuntungan ini menjadi lebih diinginkan, proses CMOS dan variannya mendominasi sirkuit digital terintegrasi modern.

Sirkuit CMOS menggunakan kombinasi MOSFET tipe-n dan tipe-p untuk mengkonstruksi gerbang logika dan sirkuit digital yang ditemui di komputer, peralatan komunikasi, dan peralatan pemroses sinyal. Walaupun logika CMOS dapat dibangun dari komponen terpisah (seperti pada proyek pemula), biasanya produk CMOS adalah rangkaian terintegrasi yang terdiri dari jutaan transistor

pada sepotong silikon seluas antara 0,1 hingga 4 sentimeter persegi. Peranti tersebut biasanya disebut dengan chip, sedangkan untuk perindustrian juga disebut dengan die (tunggal) atau dice (jamak).

2.2.1 Karakteristik MOS

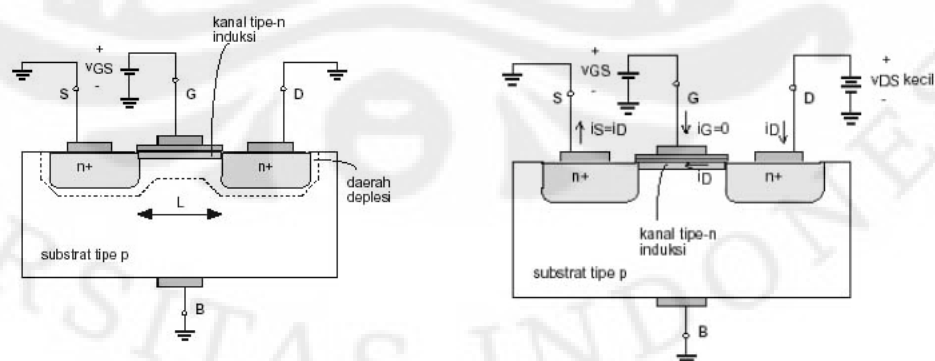
Sama seperti Transistor, MOS juga memiliki 3 buah kaki-kaki. Jika pada transistor dikenal dengan Base-Emitter-Collector, maka pada MOS dikenal dengan *Gate-Drain-Source*. Umumnya terdapat 2 buah jenis MOS. N-MOS dan P-MOS. Berikut ini adalah gambar dari macam-macam tipe MOS



Gambar 2.8. jenis MOS[12]

Karakteristik MOS dipengaruhi oleh besarnya tegangan Gate dengan Source dan tegangan Drain dengan Source sehingga dapat menghasilkan tegangan *threshold*. Hubungan tersebut tertuang pada persamaan 2.1. Gambar 2.9 menjelaskan tentang kanal MOS untuk tipe-n.

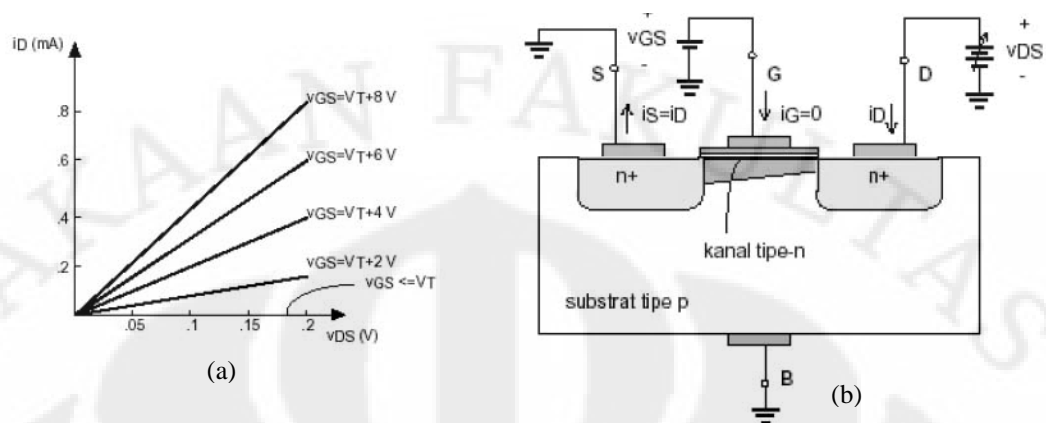
$$V_{DS} = V_{GS} - V_T \quad (2.11)$$



Gambar 2.9 Kanal N-MOS[14]

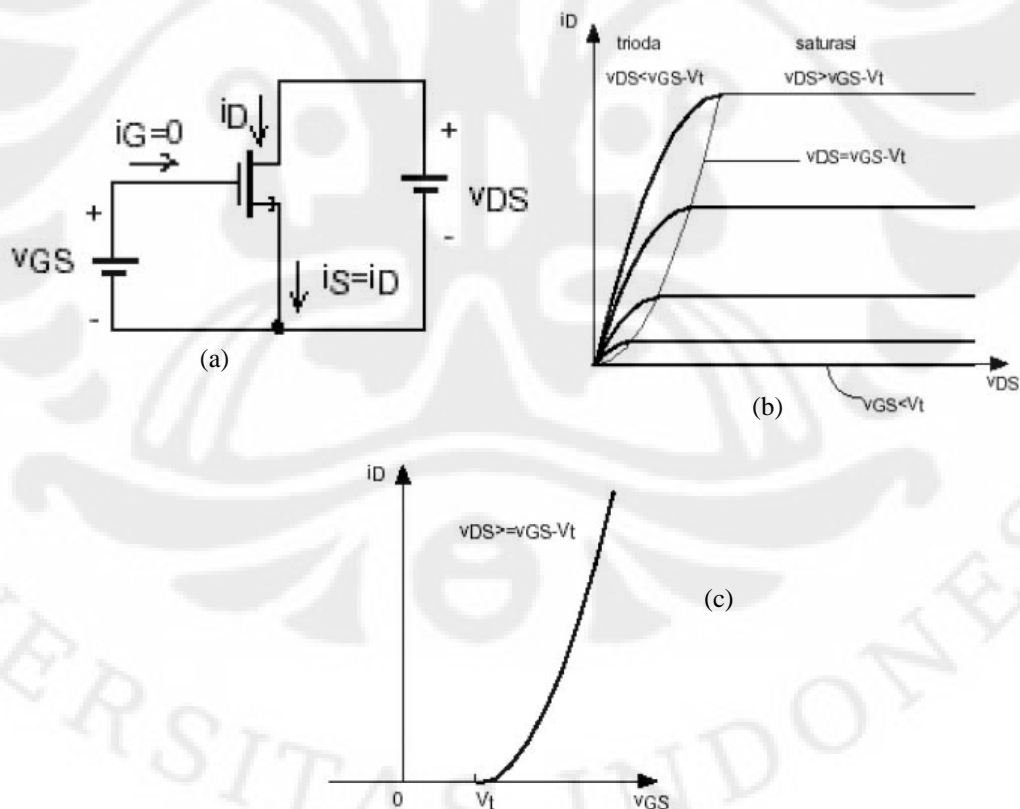
Dari persamaan 2.11 didapat hubungan perubahan tegangan yang menghasilkan Arus Drain. Arus Drain adalah arus yang berasal dari tegangan

masukkan (V_{DD}) yang mengalir hingga ke Source. Hubungan Arus Drain Dengan V_{DS} akan menyebabkan timbulnya Gambar 2.10.



Gambar 2.10 a,b. Karakteristik I_D dengan V_{DS} [14]

Pada gambar 2.10 nilai V_{GS} tetap dan nilai tegangan Threshold juga tetap, sehingga perubahan yang terjadi pada V_{DS} akan menyebabkan perubahan I_D . Dalam aplikasinya perubahan Arus I_D bisa dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 a,b,c Perubahan Arus Drain N-MOS[14]

Sehingga, pada gambar 2.11 a,b,c dapat ditentukan persamaan yang berhubungan dengan perubahan arus drain yang disebabkan oleh perubahan V_{GS} dan V_{DS} .

Dimana:

$V_{GS} < V_T$, $I_D = 0$, akan menyebabkan MOS tersebut dalam keadaan Cutoff.

$V_{GS} \geq V_T$,

Maka,

Triode, $I_D = K [2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2]$ (2.12)

Saturasi $I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$ (2.13)

$$K = \frac{\mu_n C_{ox} (W/L)}{2} \quad (2.14)$$

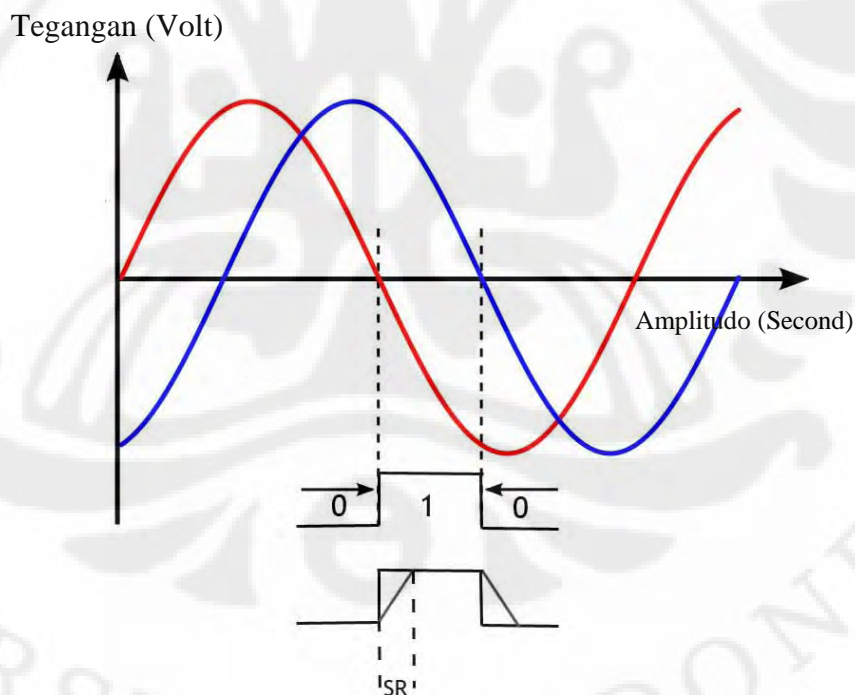
BAB 3

METODE PERANCANGAN RANGKAIAN PENGUAT OPERASI DUA TINGKAT FREKUENSI RENDAH

Pada bab ini akan dibahas mengenai metode-metode yang digunakan untuk merancang rangkaian penguat operasi dua tingkat agar mampu bekerja stabil pada frekuensi rendah

3.1 Dasar Perancangan

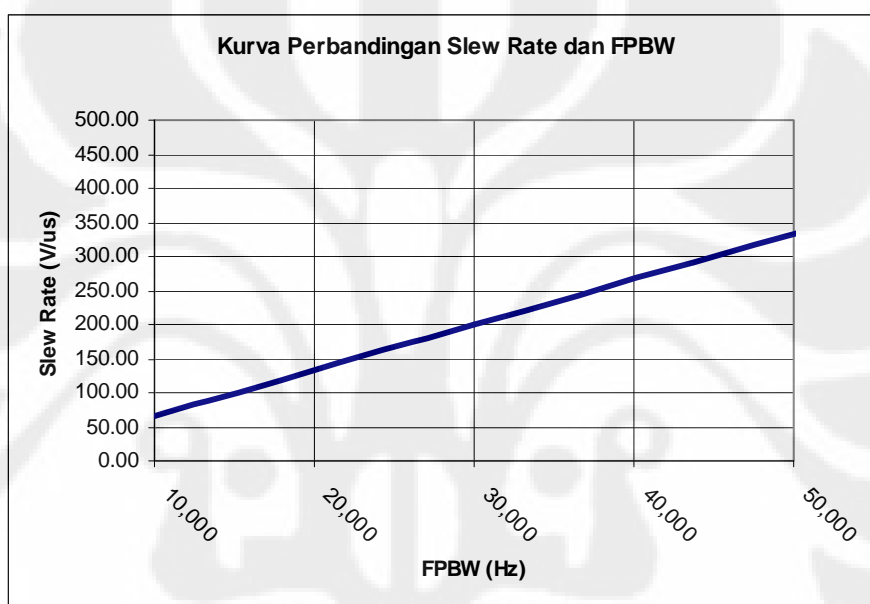
Perancangan ini didasari oleh terjadinya ketidak tepatan pengukuran pergeseran fasa yang terjadi antara masukan dan keluaran dari Op-Amp. Hal ini ditemui pada percobaan yang telah dilakukan dengan menggunakan Op-Amp yang memiliki Slew Rate $200 \text{ V}/\mu\text{S}$ dengan frekuensi kerja sebesar 30 KHz . Sehingga bisa digambarkan hasil keluarannya gambar 3.1



Gambar 3.1 Pergeseran fasa

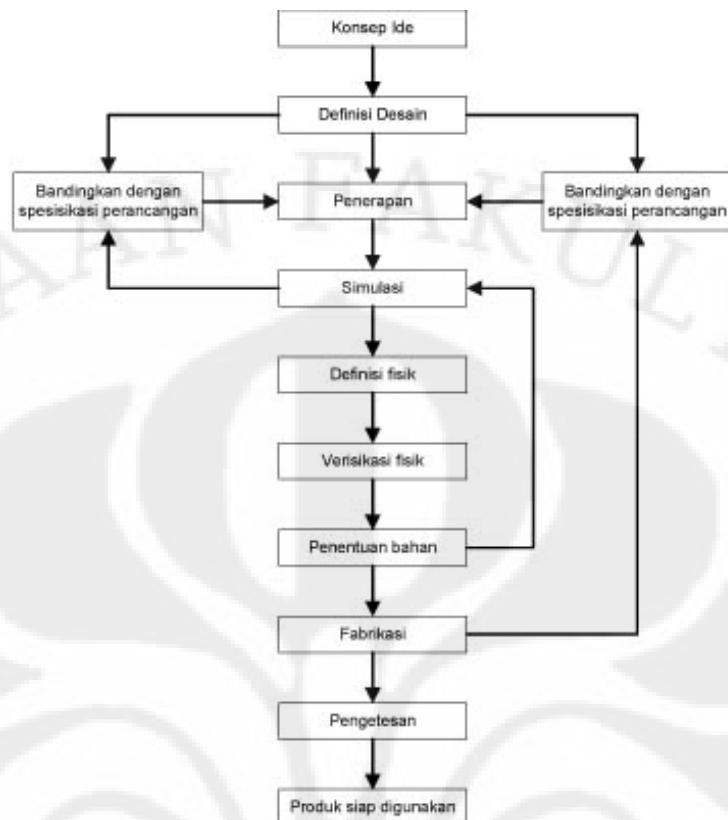
Pergeseran fasa terjadi disebabkan oleh besaran nilai impedansi (Z) yang dipengaruhi oleh besaran nilai resistansi (R) dan kapasitansi (C). Grafik pergeseran fasa bisa dilihat pada gambar 3.1.

Pada perancangan Taufik Alif [13] memiliki tingkat ketelitian pergeseran fasa kurang dari 0.0446° pada frekuensi kerja 30 KHz. Oleh karena itu, perancangan ini lebih dikhususkan untuk mendapatkan korelasi ketepatan yang tinggi dengan menggunakan rangkaian Op-Amp dua tingkat. Sehingga tingkat hubungan antara Slewrate dengan frekuensi kerja bisa dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Kurva perbandingan *slew rate* dan FPBW[13]

Setiap perancangan rangkaian terintegrasi memiliki banyak langkah – langkah yang harus dilakukan. Langkah-langkah perancangan sebuah rangkaian terintegrasi tertampil pada gambar 3.3. pada diagram alir gambar 3.3 dijelaskan bahwa, untuk merancang sebuah komponen harus melihat komponen apa dan digunakan untuk apa, dengan kata lain ide konsep komponen. Langkah selanjutnya adalah mendefinikan perancangan, lalu menerapkannya. Pada perancangan *Operational Amplifier* Dua tingkat ini hnyay dilakukan hingga tahap menerapkan atau implementasi.



Gambar 3. 3 Blok diagram untuk prinsip dasar perancangan[10]

Tetapi, dalam pengerjaan perancangan *Operational Amplifier* dua tingkat yang dilakukan hanya sampai pada tahap simulasi saja. hal itu dilakukan karena keterbatasan untuk pencapaian proses fabrikasi.

Selain dari blok perancangan dasar, untuk perancangan *Operational Amplifier* dua tingkat juga harus mengacu pada tabel 3.2. dalam tabel tersebut disebutkan untung rugi untuk menggunakan rangkaian *Operational Amplifier* dua tingkat

Tabel 3.1. Tabel untung rugi rangkaian *Operational Amplifier* sumber Sabanci University [13]

	<i>Gain</i>	<i>Output Swing</i>	<i>Speed</i>	<i>Power</i>	<i>Noise</i>
<i>Telescopic</i>	Sedang	Sedang	Sangat Tinggi	Rendah	Rendah
<i>Folded</i>	Sedang	Sedang	Tinggi	Sedang	Sedang
<i>Two Stage</i>	Tinggi	Sangat Tinggi	Rendah	Sedang	Rendah
<i>Gain Boosted</i>	Tinggi	Sedang	Sedang	Tinggi	Sedang

Didalam tabel 3.1 memperlihatkan bahwa, dalam perancangan rangkaian *Operational Amplifier* dua tingkat memiliki tingkat penguatan yang tinggi, bahkan

untu keluaran *Operational Amplifier* dua tingkat memiliki parameter yang sangat tinggi. Hanya saja dalam masalah kecepatan, rangkaian *Operational Amplifier* dua tingkat memiliki parameter yang rendah. Tetapi tingkat pengaruh luar rendah.

3.2 Parameter MOS

Silicon atau Germanium berasal dari grup ke empat dari tabel periodic. Untuk silicon memiliki nomer atom 14, sehingga Silicon berada pada level energi ke tiga.[4]. Level pertama di isi oleh 2 buah elektron ($1S^2$), selanjutnya di level ke dua di isi oleh 8 elektron ($2S^2, 2P^6$). Sedangkan di level ke tiga, Silikon hanya menempati empat elektron ($3S^2, 3P^2$). Sehingga Silikon memiliki 4 buah elektron bebas dan dapat digabungkan dengan bahan lain selanjutnya akan membentuk ikatan ion yang membuat ikatan itu stabil dan netral.

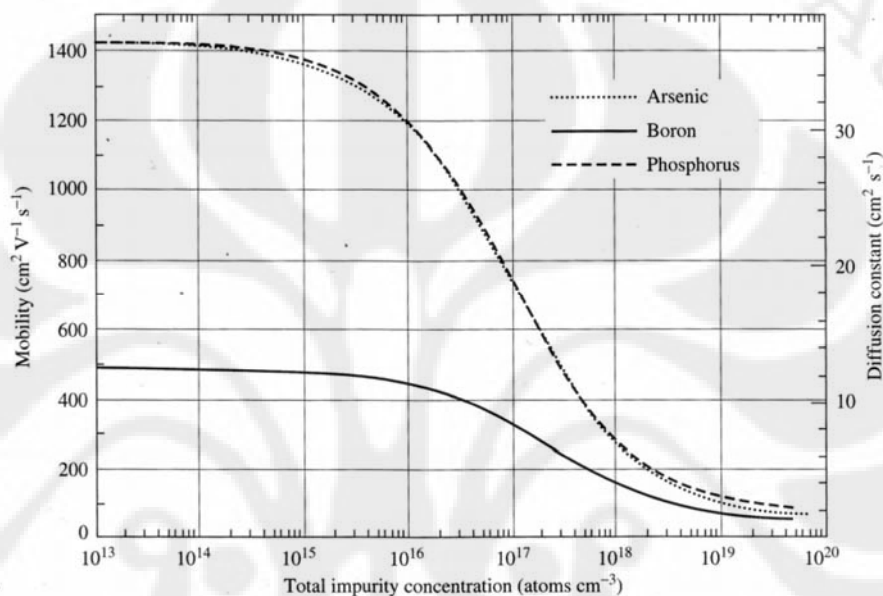
Tabel 3.2. Tabel golongan atau grup dari senyawa [4]

Grup / Golongan Periodik	Senyawa
golongan II	Be, Mg, Zn, Cd, Hg
golongan III (aseptor)	B, Al, Ga, In, Tl
golongan IV	C, Sn, Pb
golongan V (donor)	N, P, As, Sb, Bi
golongan VI	O, S, Se, Te, Po

Bila golongan V didoping ke golongan IV maka menghasilkan logam type N (elektron). Golongan III didoping ke golongan IV menghasilkan logam type P (*hole*). Logam jenis N memiliki pembawa muatan negatif sebesar $-1,6 \times 10^{-19}$ C sedang logam jenis P pembawa muatan positif $+1,6 \times 10^{-19}$ C. Apabila kedua kedua logam tersebut dihubungkan/ disambung, maka akan terjadi sambungan (*junction*) PN dan dikenal dengan nama dioda PN.

Penghantaran semikonduktor terutama hanya ditentukan oleh pembawa yang dibangkitkan panas, maka semikonduktor ini dinamakan semikonduktor murni atau instrinsik. Semikonduktor murni pada 0^0K bersifat isolator. Semikonduktor yang mengandung atom pencampur dinamakan semikonduktor teresapi, tercampur atau ekstrinsik. Penghantaran semikonduktor ekstinsik ditentukan oleh kelebihan elektron atau hole dari atom ato-atom pencampur. Pencampuran yang sering digunakan adalah golongan III dan V.

Semikonduktor yang berisi pencampur jenis donor (golongan V) dinamakan semikonduktor jenis N, karena pembawa-pembawa arus yang dihasilkan merupakan muatan negatif (elektron) sedang yang berisi pencampur jenis aseptor (golongan III) dinamakan semikonduktor jenis P karena pembawa-pembawa arusnya merupakan muatan positif (lobang).



Gambar 3.4 Total impurity concentration terhadap mobility[7]

Elektron bergerak untuk mencari lubang yang kosong yang disebabkan oleh prosesi dopping. Dari gambar 3.4, penentuan tipe-n ataupun tipe-p juga ditentukan dari mobilitas elektron. Mobilitas elektron adalah pergerakan elektron didalam suatu senyawa semikonduktor. Untuk menentukan mobilitas elektron dalam sebuah tipe dapat ditentukan pada persamaan mobilitas seperti dibawah ini.

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + (N / N_{ref})^\alpha} \quad (3.1)$$

Dari persamaan tersebut telah ditentukan besaran mobilitas tiap jenis unsur. Hal tersebut tertera pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 mobilitas unsur untuk doping semikonduktor

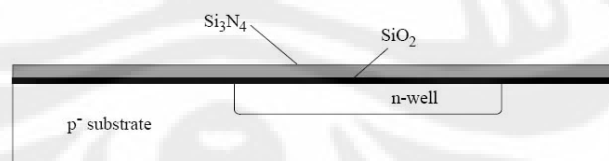
Parameter	Arsenik	Phosporus	Boron
μ_{\max}	52,2	68,5	44,9
μ_{\min}	1417	1414	470,5
N_{ref}	$9,68 \times 10^{16}$	$9,20 \times 10^{16}$	$2,23 \times 10^{17}$
α	0,680	0,711	0,719

Sumber : tabel penjelasan dari Dr.Ir.Agus Santoso Tamsir, M.T.

Dari tabel diatas didapat bahwa untuk *Boron* memiliki sifat tipe-p karena *Boron* memiliki jumlah elektron bebas lebih sedikit dari pada silikon. Sedangkan untuk *Phosphorus* dan *Arsenik* memiliki sifat tipe-n. Karena jumlah elektron bebas yang dihasilkan oleh *Phosphorus* dan *Arsenik* lebih banyak dari pada Silikon. Dalam implementasinya, Arsenik tidak digunakan untuk membuat sebuah komponen semi konduktor. Hal ini disebabkan oleh *Arsenik* merupakan senyawa beracun apabila masuk kedalam tubuh manusia.

Langkah selanjutnya adalah menentukan t_{ox} . Parameter t_{ox} merupakan parameter yang menentukan ketebalan dari bahan *Silicon Dioxide* (SiO_2). Fungsi t_{ox} adalah sebagai pembatas antara p-substrate dengan *Silicon Nitrit* (Si_3N_4) sebagai bahan baku dari pelapisan semikonduktor.

Parameter t_{ox} memiliki batasan dalam penggunaannya. Sebab t_{ox} memiliki batasan antara kurang dari 150 Å (150 *Angstrom* atau 150×10^{-10}) untuk Gate Oxide atau lebih besar dari 10.000 Å (10.000 *Angstrom* atau 10.000×10^{-10}) untuk Field Oxide seperti terlihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.5. wafer layer MOS[10]

Setelah besaran t_{ox} ditentukan, maka dapat ditentukan pula nilai dari kapasitansi *Silicon Dioxide* atau C_{ox} . Nilai dari C_{ox} adalah pembagian antara ϵ_{ox} dengan t_{ox} seperti yang diperlihatkan pada persamaan dibawah ini

$$C_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox} \quad (3.2)$$

Untuk mendapatkan koefisien ϵ_{ox} dapat ditentukan dengan mengalikan nilai dari ϵ_0 dengan variabel 3,9. sedangkan nilai dari ϵ_0 itu sendiri adalah $8,85 \times 10^{-14}$ F/cm. Seperti yang diperlihatkan pada persamaan dibawah ini.

$$\epsilon_{ox} = \epsilon_0 \times 3.9 \quad (3.3)$$

Langkaha selanjutnya adalah menentukan K. Penentuan K ini memiliki 2 buah parameter K_n dan K_p . K_n dan K_p merupakan korelasi hubungan antara μ_n dengan μ_p seperti yang tertuang pada persamaan dibawah ini.

$$K_n = \mu_n \times C_{ox} \quad (3.4)$$

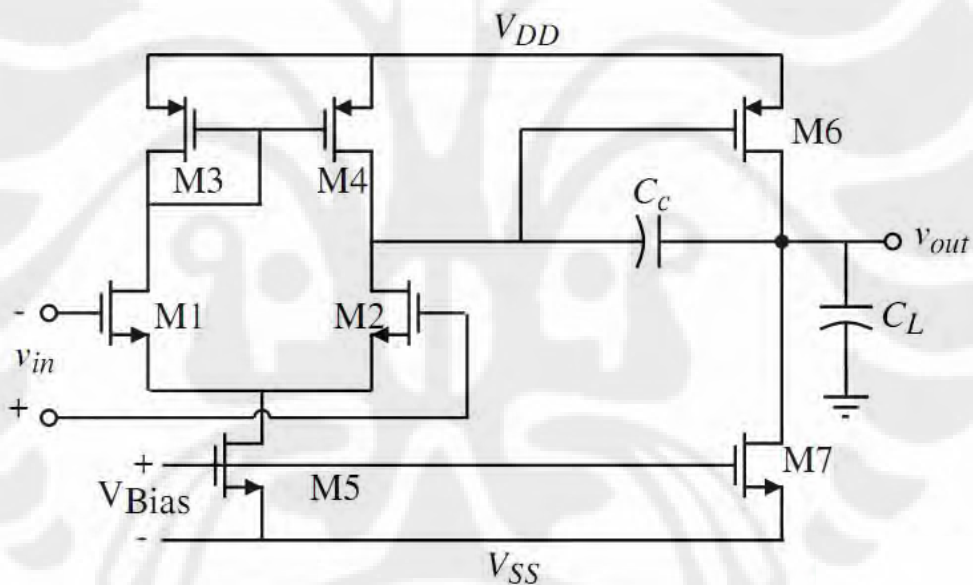
$$K_p = \mu_p \times C_{ox} \quad (3.5)$$

Tabel 3.4 Parameter MOS 0.4 μm [2]

Parameter	Symbol	Value	Value	Units
		n- Channel Transistor	p-Channel Transistor	
Substrate doping	N_A, N_D	5×10^{15}	4×10^{16}	Atoms/cm ³
Gate oxide thickness	t_{ox}	80	80	Å
Metal-silicon work function	Φ_{ms}	-0.6	-0.1	V
Channel mobility	μ_n, μ_p	450	150	cm ² /V-s
Minimum drawn channel length	L_{drwn}	0.4	0.4	Mm
Source, drain junction depth	X_j	0.15	0.18	Mm
Source, drain side diffusion	L_d	0.09	0.09	Mm
Overlap capacitance per uni gate width	C_{ol}	0.35	0.35	fF/ μm
Threshold adjus implant (box dist) impurity		P	P	
effective depth	X_i	0.16	0.16	Mm
effective surface concentration	N_{si}	4×10^{16}	3×10^{16}	Atoms/cm ³
Nominal treshold voltage	V_t	0.6	-0.8	V
Polysilicon gate doping concentration	N_{dpoly}	1×10^{20}	1×10^{20}	Atoms/cm ³
Poly gate sheet resistance	R_s	5	5	Ω
Source, drain-bulk junction capacitances	C_{j0}	0.2	0.4	fF/ μm^2
Surce, drain-bulk junction capacitance	n	0.5	0.4	
Source, drain periphery capacitance (zero	C_{jsw0}	1.2	2.4	fF/ μm
Source, drain periphery capacitance grading	n	0.4	0.3	
Source, drain junction built-in-potential	Ψ_0	0.7	0.7	V
Surface-state density	Q_{ss}/q	1×10^{11}	1×10^{11}	Atoms/cm ²
Channel-length modulation parameter	λ	0.02	0.04	$\mu\text{m}/\text{V}$

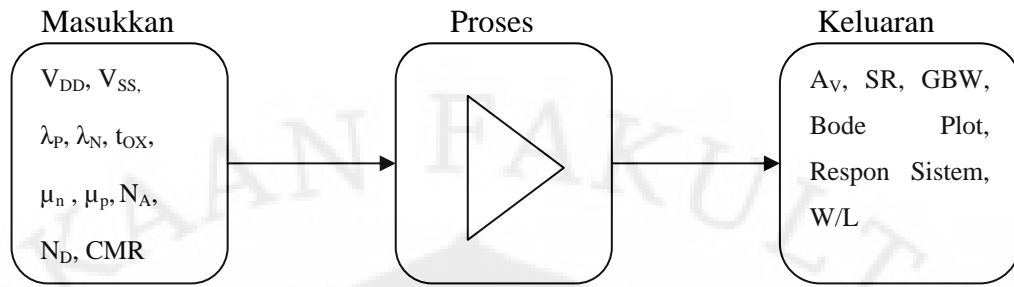
3.3 Parameter Operational Amplifier

Menurut Holt (1987)[10], rangkaian *operational amplifier* dua tingkat merupakan suatu rangkaian yang terdiri dari 7 buah MOS. Dari ke tujuh MOS tersebut terdapat 4 buah N-MOS dan 3 buah P-MOS. Untuk keempat N-MOS tersebut memiliki 3 buah karakteristik yang berbeda antara satu dengan yang lainnya. Untuk N-MOS 1 sama dengan N-MOS 2 yang sama-sama sebagai masukan. Sedangkan N-MOS 5 dan NMOS 7 memiliki karakteristik yang berbeda pula. Sedangkan untuk P-MOS terdapat 3 buah dengan 2 karakteristik yang berbeda pula. P-MOS 3 sama dengan P-MOS 4 yang sama-sama sebagai masukan referensi.



Gambar 3. 6 Rangkaian Operational amplifier dua tingkat[10]

Untuk menentukan parameter *operational amplifier* yang sesuai dengan keinginan, maka harus merujuk pada proses gambar 3.7. Dari gambar 3.7 dapat ditentukan beberapa parameter bebas dan parameter tetap untuk merancang *Operational amplifier*



Gambar 3. 7 Perancangan Masukkan – Keluaran Rangkaian Operational amplifier dua tingkat

Persamaan Perancangan untuk rangkaian Two-stage *Operational Amplifier* diatas:

$$\text{Slew rate SR} = \frac{I_5}{C_c} \quad (\text{Assuming } I_7 \gg I_5 \text{ and } C_L > C_c) \quad (3.6)$$

$$\text{First-stage gain } A_{v1} \equiv \frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} \equiv \frac{2g_{m1}}{I5(\lambda_2 + \lambda_4)} \quad (3.7)$$

$$\text{Second-state gain } A_{v2} \equiv \frac{g_{m6}}{g_{ds6} + g_{ds7}} \equiv \frac{g_{m6}}{I6(\lambda_6 + \lambda_7)} \quad (3.8)$$

$$\text{Gain-bandwidth GB} = \frac{g_{m1}}{C_c} \quad (3.9)$$

$$\text{Output pole } p_2 = \frac{-g_{m6}}{C_c} \quad (3.10)$$

$$\text{RHP zero } z_1 = \frac{g_{m6}}{C_c} \quad (3.11)$$

$$60^\circ \text{ phase margin requires that } g_{m6} = 2.2g_{m2}(C_L / C_c) \text{ if all other roots are } \geq 10\text{GB} \quad (3.12)$$

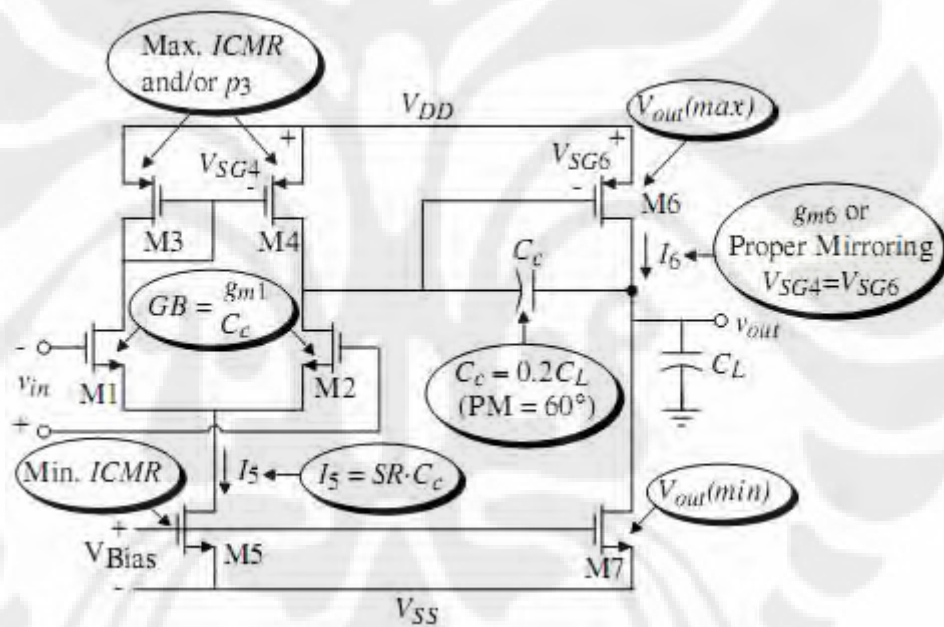
$$\text{Positive ICMR } V_{in(max)} = V_{DD} - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_3}} - |V_{T03}|_{(max)} + V_{T1(min)} \quad (3.13)$$

$$\text{Negative ICMR } V_{in(min)} = V_{SS} + \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} + V_{T1(max)} + V_{DS5(sat)} \quad (3.14)$$

$$\text{Saturation voltage } V_{DS(sat)} = \sqrt{\frac{2I_{DS}}{\beta}} \quad (\text{all transistors are saturated}) \quad (3.15)$$

Setelah mengetahui persamaan – persamaan yang dibutuhkan untuk menentukan nilai-nilai parameter diatas, kita dapat melakukan desain dengan membuat spesifikasi tertentu untuk mencapai suatu hasil yang diinginkan. Spesifikasi-Spesifikasi tersebut dapat berupa:

- Gain (A_v)
- Gain bandwidth (GB)
- Settling time (T_s)
- Slew rate (SR)
- Input common –mode range, ICMR
- Output –voltage swing



Gambar 3. 8 Parameter operational amplifier penguatan dua tingkat[12]

3.4 Perancangan Rangkaian Penguat Operasi Dua Tingkat Frekuensi Rendah

Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai/hasil yang diinginkan pada desain rangkaian penguat. Hal ini dilakukan dengan melakukan pengolahan data untuk mendapatkan nilai dan parameter dari masing transistor agar desain rangkaian dapat mencapai spesifikasi yang diinginkan.

Dalam prosedur desain ini diasumsikan bahwa *Gain* pada dc (A_v), *unity Gain bandwidth* (GB), *input common mode range* ($V_{in}(\min)$ dan $V_{in}(\max)$), *load capacitance* (C_L), *slew rate* (SR), *settling time* (T_s), *output voltage swing* ($V_{out}(\max)$ dan $V_{out}(\min)$) dan disipasi daya (P_{diss}) diberikan. Pilih panjang device yang paling kecil yang akan menjaga parameter *channel modulation* tetap konstan dan memberikan kecocokan yang baik untuk *current mirrors*.

Parameter yang harus ditentukan serta dihitung, antara lain:

3.4.1 *Capasitor Load* (C_L)

Menurut Holt (1987), dari nilai *Capasitor Load* akan didapatkan sebuah besaran C_c yang dikenal dengan kompensasi kapasitor yang dapat ditentukan dari persamaan dibawah ini dengan mengacu pada *Phase Margin* yang besarnya 60°

$$C_c > 0.22C_L \quad (3.16)$$

3.4.2 *Slew Rate*

Slew Rate adalah rata-rata perubahan tegangan keluaran maksimum. *Slew Rate* dapat pula diartikan dengan kecepatan suatu sistem guna menempuh keadaan maksimum. Hal ini dapat ditentukan dengan persamaan dibawah ini.

$$I_5 = SR \cdot C_C \quad (3.17)$$

atau

$$I_5 \cong 10 \left(\frac{V_{DD} + |V_{SS}|}{2 \cdot T_s} \right) \quad (3.18)$$

Dari persamaan diatas akan didapat sebuah besaran dari *Tail Current* atau arus yang mengalir dari Drain yang berasal dari N-MOS 5. Setelah *Tail Current* ditentukan maka akan dapat menentukan panjang dan lebar dari suatu MOS. Untuk hal ini yang dapat ditentukan adalah panjang dan lebar dari P-MOS 3.

$$S_3 = \frac{I_5}{K'_3 [V_{DD} - V_{in}(\max) - |V_{T03}|(\max) + V_{T1}(\min)]^2} \quad (3.19)$$

3.4.3 Gain Bandwidth (GBW)

Gain Bandwidth adalah lebar frekuensi tertentu dimana tegangan keluaran tidak jatuh dari 0,707 atau -3dB dari harga tegangan maksimum pada saat amplitudo tegangan masukan tetap. Setelah menentukan *Gain Bandwidth* maka akan didapat sebuah persamaan untuk menentukan *Small Signal* (g_m) dari N-MOS2 atau N-MOS1 dengan melihat persamaan dibawah ini.

$$g_{m1} = GB.C_c \rightarrow S_2 = \frac{gm_2^2}{K'_2 I_5} \quad (3.20)$$

Setelah ditentukan besaran dari $g_{m1,2}$ maka akan didapatkan sebuah besaran dari panjang dan lebar untuk suatu N-MOS, yaitu pada N-MOS1 atau N-MOS2.

3.4.4. V_{dd} dan V_{ss}

V_{dd} dan V_{ss} merupakan suatu tegangan yang didapat dari tegangan masukan pada *Drain* dan pada *Source*. V_{dd} dan V_{ss} akan berpengaruh untuk menentukan keluaran yang kita inginkan.

$$V_{DS5}(sat) = v_{in}(\min) - V_{ss} - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} - V_{T1}(\max) \geq 100 \text{ mV} \rightarrow S_5 = \frac{2I_5}{K'_5 [V_{DS5}(sat)]^2} \quad (3.21)$$

3.4.5 g_{m6}

g_{m6} adalah *Small Signal* yang berada pada MOS6. Sehingga besaran dari g_{m6} akan ditentukan dari persamaan dibawah ini.

$$g_{m6} = 2.2 g_{m2} (C_L / C_c) \rightarrow S_6 = S_4 \frac{g_{m6}}{g_{m4}} \quad (3.22)$$

Dari persamaan tersebut akan didapat besaran dari arus yang mengalir pada MOS6 yang tertera pada persamaan dibawah ini.

$$I_6 = \frac{g_{m6}^2}{2K'_6 S_6} \quad (3.23)$$

Sebenarnya untuk menentukan besaran dari I_6 terdapat 2 buah persamaan. Untuk menentukan persamaan mana yang akan dipakai akan ditinjau dari perbandingan hasil kedua persamaan. Besaran I_6 yang paling besar lah yang akan digunakan untuk selanjutnya.

3.4.5 S_7

Tentukanlah besaran dari panjang dan lebar dari MOS7 dengan melihat persamaan dibawah ini.

$$S_7 = (I_6/I_5)S_5 \quad (3.24)$$

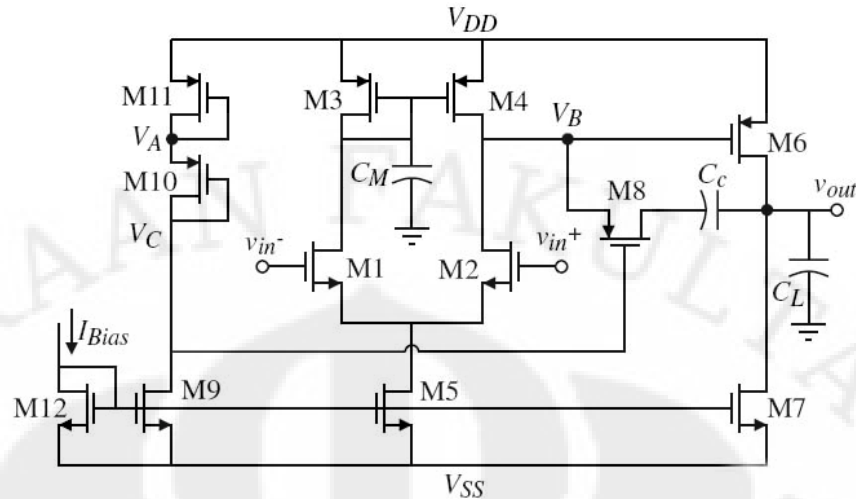
Selanjutnya adalah dengan mencari A_V yang sesuai dengan perhitungan, setelah itu hitung besarnya disipasi daya dari rangkaian tersebut dengan melihat persamaan dibawah ini

$$P_{diss} = (I_5 + I_6)(V_{DD} + |V_{SS}|) \quad (3.25)$$

$$A_V = \frac{2g_{m2}g_{m6}}{I_5(\lambda_2 + \lambda_3)I_6(\lambda_6 + \lambda_7)} \quad (3.26)$$

Bila spesifikasi penguatan tidak tercapai kemudian arus I_5 dan I_6 bisa diturunkan atau rasio W/L dari M2 dan atau M6 bisa dinaikkan. Perhitungan sebelumnya harus dicek kembali untuk meyakinkan bahwa semuanya memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Bila disipasi daya terlalu besar, yang dilakukan hanyalah mengurangi arus I_5 dan I_6 . Pengurangan arus akan memungkinkan peningkatan kebutuhan untuk menaikkan beberapa rasio W/L untuk memenuhi masukan dan *output swings*.

Dengan menggunakan kompensasi Miller dapat ditentukan besaran Pole dan Zero dari rangkaian *Operational Amplifier* dua tingkat. Kompensasi miller diperlukan untuk menetuk frekuensi yang akan digunakan.



Gambar 3. 9 Rangkaian operational dua tingkat dengan kompensasi Miller[10]

Langkah berikutnya adalah menentukan *Pole* dan *Zero* dengan menggunakan persamaan dibawah ini[10]:

$$p_1 = -\frac{g_{m2}}{A_v C_c} = -\frac{g_{m2}}{A_v C_c} \quad (3.26)$$

$$p_4 = -\frac{1}{R_z C_1} \quad (3.27)$$

$$p_2 = -\frac{g_{m6}}{C_L} \quad (3.28)$$

$$z_1 = \frac{-1}{R_z C_c - C_c / g_{m6}} \quad (3.29)$$

Setelah semua parameter dimasukkan maka semua data yang didapat dimasukkan kedalam *Microsoft Excel* untuk mendapatkan keluaran yang sesuai dengan keinginan. Selanjutnya dari *Pole* dan *Zero* yang sudah ditentukan, besaran dari *Pole* dan *Zero* tersebut dimasukkan kedalam program *Mathlab 7.1* untuk mendapatkan respon sistem.

3.5 Proses Simulasi Rangkaian

Pada tahap berikutnya adalah tahap pensimulasian rangkaian. Pada tahap ini nilai yang telah didapat dari percobaan diatas dimasukan kedalam parameter –

parameter rangkaian untuk mengetahui apakah rangkaian yang telah didesain memenuhi spesifikasi yang diharapkan sehingga mampu bekerja pada frekuensi tinggi.

Dalam proses simulasi rangkaian ini digunakan perangkat lunak *Microsoft Excel* untuk mempermudah dalam mencari besaran yang diinginkan. Dengan memasukkan nilai yang telah didapatkan pada tahap sebelumnya akan diuji apakah desain rangkaian memenuhi spesifikasi yang diharapkan sebelumnya.

Metode ini akan dilanjutkan pada perangkat lunak *Mathlab 7.1* yang digunakan respon sistem dari rangkaian yang telah dihitung besaran pole dan zeronya. Cara memasukkan besaran pole dan zeronya dengan mengetik masukkan yang sesuai dengan perintah *Mathlab 7.1*. Setelah itu dilanjutkan dengan menjalankan perintah 'bode' pada command windows *Mathlab* untuk melihat diagram Bode. Lalu dilanjutkan dengan memasukkan perintah 'step' untuk melihat respon sistem dari rangkaian tersebut.

BAB 4

KAJIAN PERHITUNGAN DAN ANALISA RANGKAIAN PENGUAT OPERASI DUA TINGKAT FREKUENSI RENDAH

Kajian perancangan rangkaian ini menggunakan 2 buah metode. Metode penentuan dari karakteristik MOS dan penentuan dari karakteristik rangkaian terintegrasi dua tingkat.

4.1 Kajian Penentuan Parameter MOS

Untuk menentukan spesifikasi MOS yang akan digunakan maka ada beberapa hal yang harus ditentukan terlebih dahulu seperti yang telah dibahas pada BAB sebelumnya. Maka parameter-parameter itu antara lain: N_A / N_D , t_{OX} , K_n / K_p , C_{ox} , μ_n / μ_p dan V_T

Dari penentuan-penentuan parameter yang akan digunakan untuk menentukan variabel dari MOS. Maka untuk mempermudah perhitungan, digunakan Microsoft Excel 2003 untuk menentukan hasil dari persamaan yang didapat dari persamaan-persamaan diatas

Dari tabel 3.4 pada BAB sebelumnya mendapatkan parameter-parameter yang tersedia pada proses fabrikasi. Oleh karena itu, digunakan beberapa parameter yang didapat dari hasil penelusuran literatur. Pada tabel 4.1 adalah parameter yang akan digunakan untuk teknologi 0.4 μm .

Tabel 4.1: parameter CMOS yang digunakan

Vto3(max) (Volt)	8.00E-01
Vt1(min) (Volt)	6.00E-01
Kp3 (A/Volt ²)	6.47E-03
Kn1 (A/Volt ²)	1.94E-02
Vti (max)	8.00E-01
Vds6(sat)	0.3
lambda2 (Volt ⁻¹)	0.04
lambda3 (Volt ⁻¹)	0.02
lambda6 (Volt ⁻¹)	0.02
lambda7 (Volt ⁻¹)	0.04

4.2. Kajian Awal Penguat Operasi

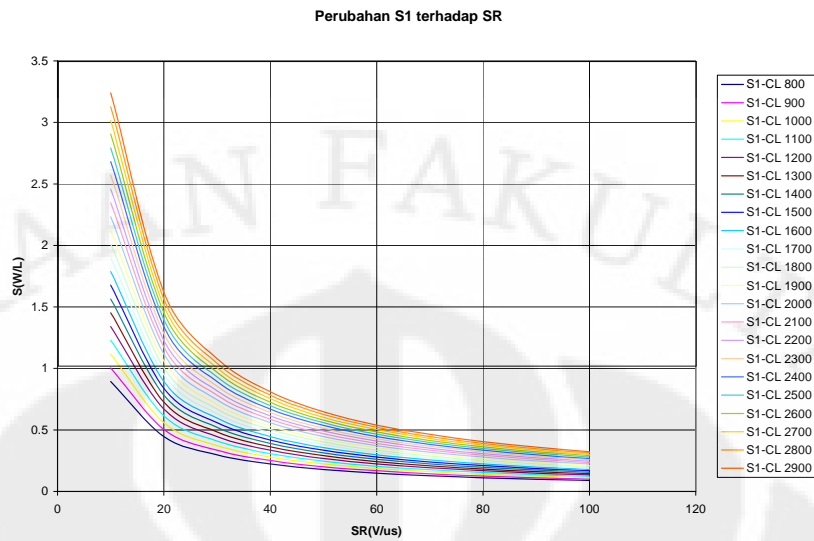
Untuk menentukan parameter-parameter yang akan dilakukan untuk menganalisa rangkaian maka akan digunakan parameter masukan sebagai berikut: *Slewrate*, A_v , *Gain Bandwidth*, *CMR*, C_L , V_{DD} , V_{SS} , *Vout range*, P_{diss}

Maka dalam percobaan ini menggunakan beberapa data sebagai acuan untuk perbandingan keluaran yang diinginkan. Pada data ini dilakukan dengan cara merubah parameter C_L , *Slewrate*, dan V_{DD} / V_{SS} .

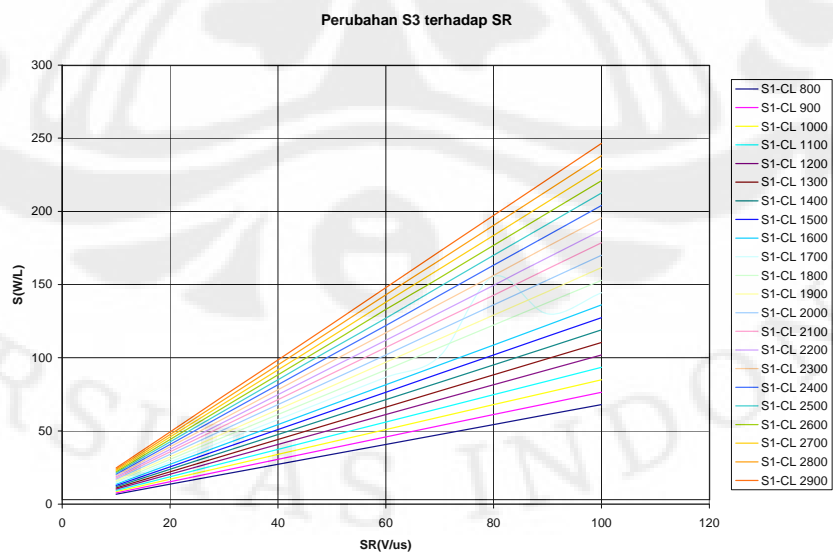
Pada percobaan pertama diberi masukan V_{DD} sebesar 5 V, dan V_{SS} sebesar -5 Volt. Selanjutnya nilai *Slewrate* diubah-ubah dari 10 V/ μ S hingga 100 V/ μ S dan C_L diubah juga dari 800 pF hingga 2900 pF maka didapat data 1 sampai 23. Kemungkinan yang dihasilkan dari perhitungan dibatasi dengan parameter A_v lebih besar dari 5000, disipasi daya kurang dari 110 mW yang menghasilkan *Slewrate* dan *Gain* (A_v) paling tinggi. Jika dirangkum maka parameter diatas tertuang pada tabel 4.2.

Tabel 4.2: parameter masukan yang digunakan

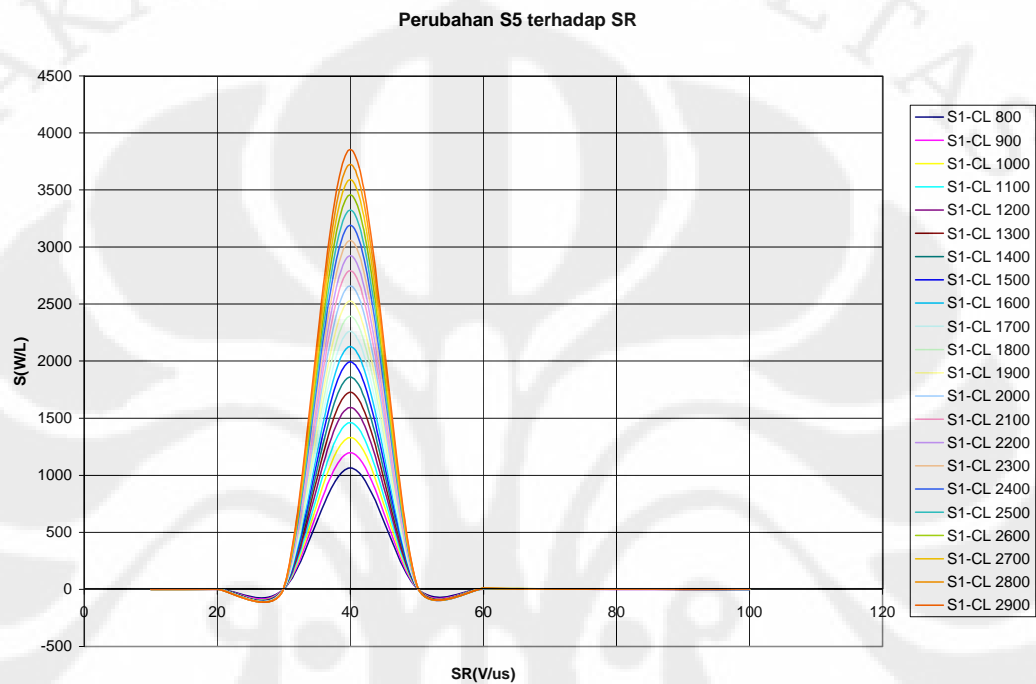
untuk 5 Volt	Data
$A_v > (V/V)$	5000
GB (Hz)	5.00E+06
CMR max(Volt)	5
Min	-3
C_L (Farad)	800-2900 pF
SR > (V/ μ s)	10-100
Vdd (Volt)	5
Vss (Volt)	-5
Vout range	4
	-4
$P_{diss} < (mW)$	110



Dengan menggunakan Microsoft Excel didapat 230 data yang bisa dilihat rinciannya pada lampiran C. Pada gambar 4.1 memperlihatkan perubahan nilai S_1 terhadap nilai *Slewrate* dan kapasitor *Load* yang digunakan. Sebelum menentukan nilai *Slewrate* harus melihat syarat bahwa nilai S harus lebih besar dari 1. Maka nilai *Slewrate* yang diperbolehkan yaitu kurang dari $29 \text{ V}/\mu\text{s}$ untuk memperlihatkan nilai S_1 dengan *Capasitor Load* sebesar 2900 pF . Disamping itu dengan nilai kapasitor *Load* harus lebih besar dari 1000 pF didapat batasan minimal *Slewrate* sebesar $11 \text{ V}/\mu\text{s}$.

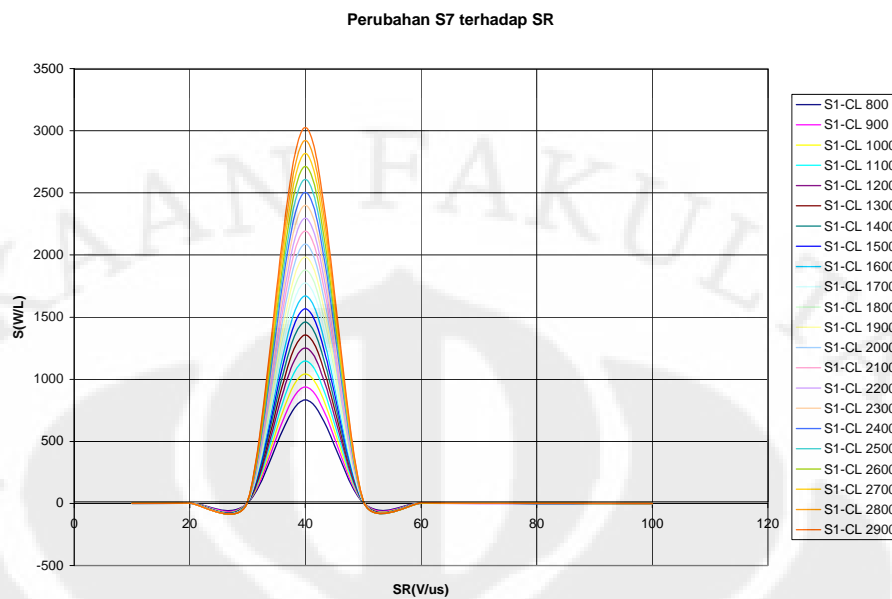


Selanjutnya menentukan nilai dari S_3 . Penentuan S_3 terlihat pada gambar 4.2 telah memenuhi syarat, sebab nilai seluruh S bernilai lebih besar dari 1. oleh karena itu perubahan *slewrata* dan kapasitor *load* untuk S_3 tidak memiliki batasan

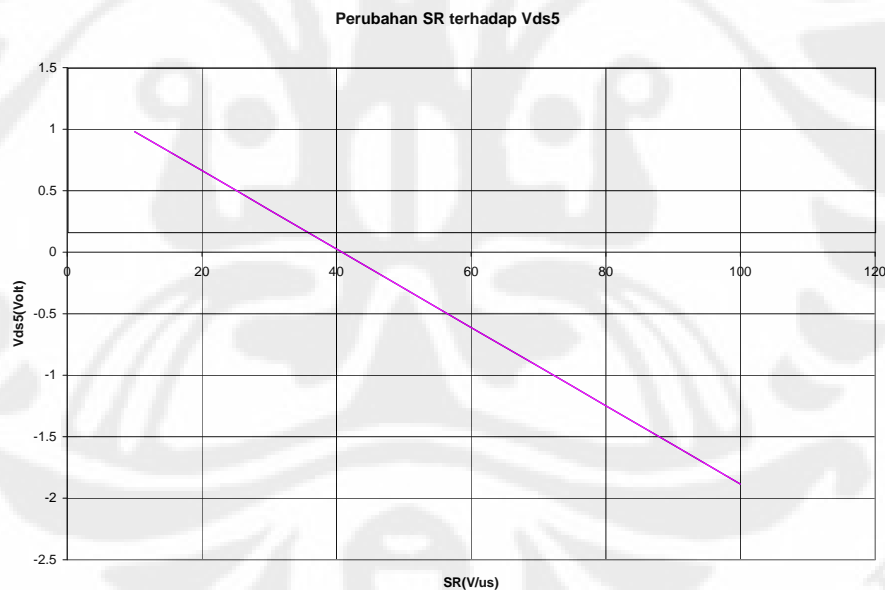


Gambar 4.3. Perubahan S_5 terhadap *Slewrata* dan C_L

Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai *Slewrata* dan C_L berdasarkan melihat perubahan dari S_5 . Dari gambar 4.3 dan gambar 4.4 memiliki kurva yang mencapai kondisi puncak pada saat *Slewrata* bernilai $40 \text{ V}/\mu\text{s}$. Hal ini disebabkan oleh nilai V_{DS5} yang harus lebih besar dari 100 mV yang terlihat pada gambar 4.6. Sedangkan untuk menentukan nilai S yang diperbolehkan masih tetap menggunakan ketentuan dimana nilai S harus lebih besar 1.

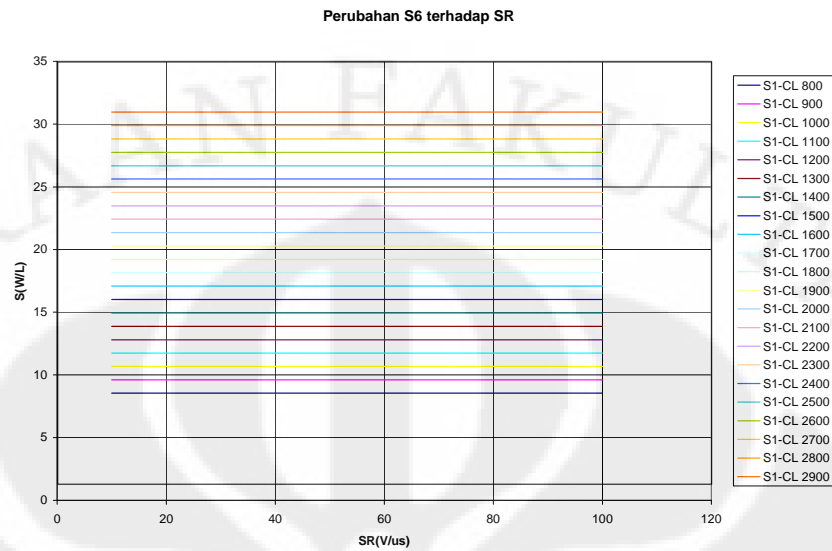


Gambar 4.4. Perubahan S_7 terhadap *Slewrate* dan C_L



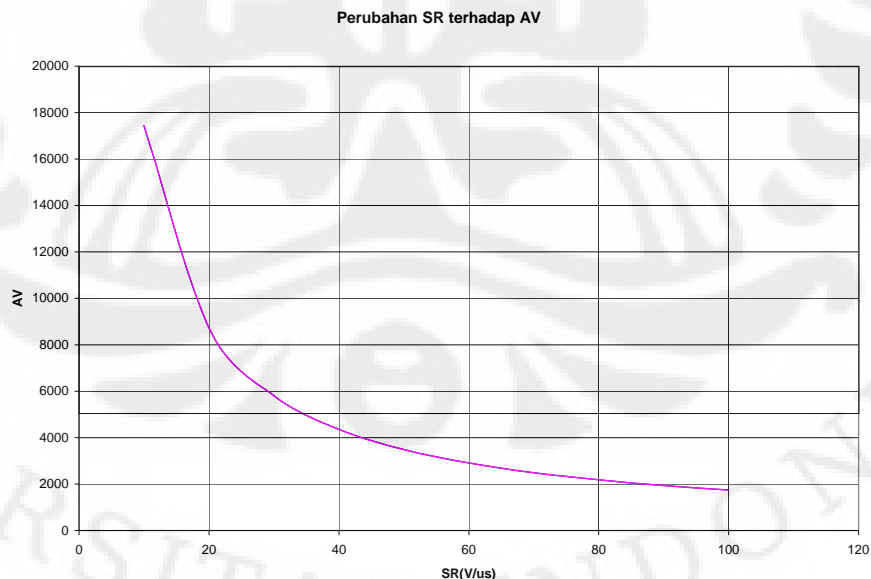
Gambar 4.5. perubahan *Slewrate* dan C_L terhadap V_{DS5}

Perubahan nilai V_{DS5} sangat mempengaruhi besaran dimensi untuk S_5 dan S_7 . Tetapi, jika nilai V_{DS5} sesuai dengan persyaratan, yaitu 100mV, maka hasilnya adalah sesuai dengan batasan. Jika tidak, maka nilai S akan menjadi lebih besar atau bahkan kurang dari 1. Jadi batas maksimal nilai *Slewrate* untuk memperoleh nilai V_{DS5} lebih besar dari 100 mV adalah sebesar 37 V/ μ s



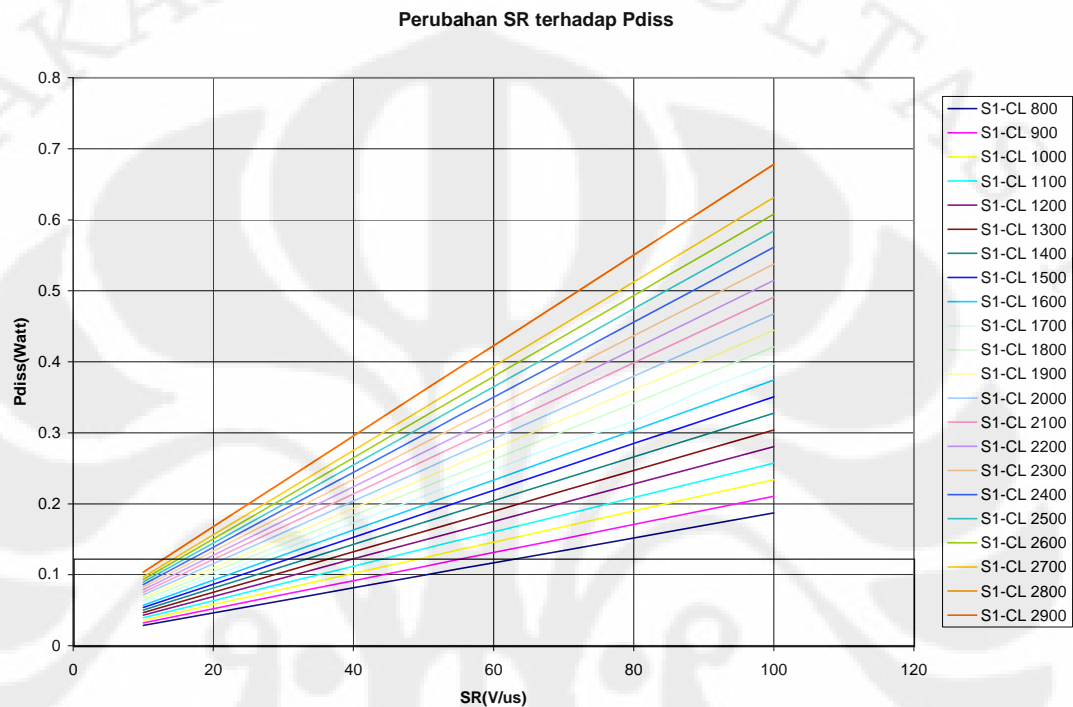
Gambar 4.6. Perubahan S_6 terhadap *Slewrates* dan C_L

Selanjutnya adalah menentukan besaran S dari MOS keluaran. Dari gambar 4.6. perubahan nilai *Slewrates* dan C_L membuat nilai dari S_6 memenuhi persyaratan, yaitu lebih besar dari 1. Seluruh nilai S bernilai sama untuk seluruh perubahan C_L membuat nilai S_6 tidak dipengaruhi *Slewrates*.



Gambar 4.7. perubahan A_V terhadap *Slewrates* dan C_L

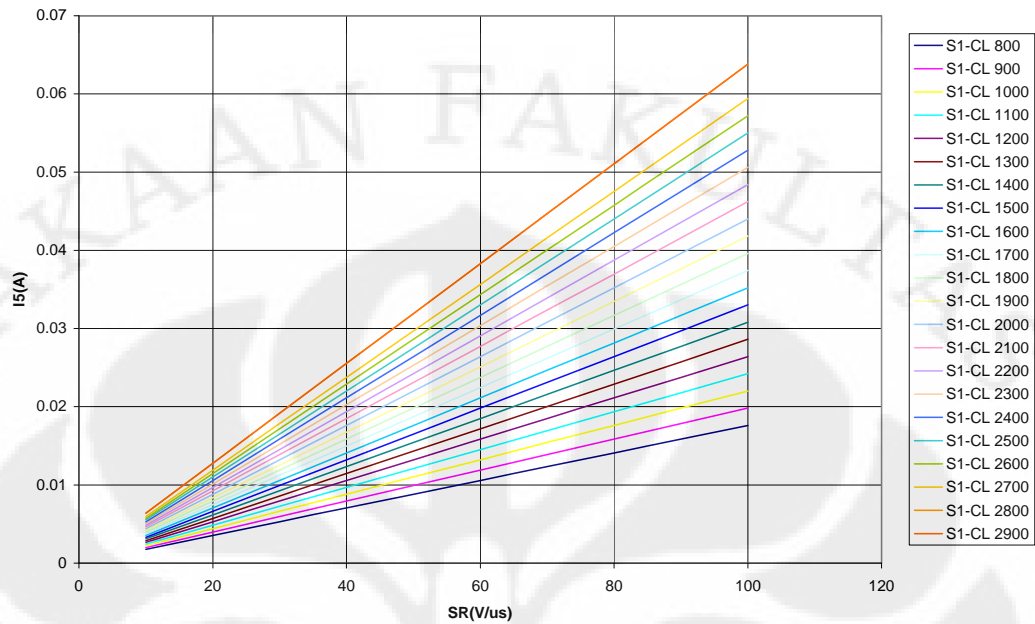
Perubahan-perubahan yang terjadi pada S akan berdampak pada tidak berubahnya nilai penguatan. Berdasarkan gambar 4.7. terlihat jelas bahwa perubahan A_V hanya dipengaruhi oleh perubahan nilai Slewrate. Hanya saja dalam penentuan op-amp dibatasi dengan dinilai A_V lebih besar dari 5000.



Gambar 4.8. perubahan disipasi daya terhadap *Slewrate* dan C_L

Untuk mendapatkan nilai dari disipasi daya dibawah 110 mW dilakukan dengan merubah nilai *Slewrate* dan C_L . Sehingga didapat gambar 4.8 yang terlihat jelas semakin besar perubahan C_L dan *Slewrate* akan berakibat pada disipasi daya yang semakin besar pula. Batas maksimal untuk nilai *Slewrate* yang sesuai dengan persyaratan disipasi daya adalah 60 V/ μ s untuk nilai C_L 800 pF. Sedangkan batas minimal *Slewrate* adalah sebesar 11 V/ μ s untuk nilai C_L 2900 pF.

Perubahan SR terhadap I5

Gambar 4.9. perubahan I_5 terhadap *Slewrates* dan C_L

Perubahan I_5 sebanding dengan perubahan *Slewrates* dan C_L terhadap. Hal ini tertuang pada gambar 4.8. I_5 juga dikenal dengan arus tail, maksudnya arus ini mengalir dari V_{DD} hingga V_{SS} .

Jika seluruh parameter telah dicapai maka didapatkan sebuah besaran untuk C_L dan *Slewrates*. Nilai *Slewrates* yang didapat adalah 20 V/ μ s, sedangkan C_L yang didapat adalah 1800 pF. Hal ini sesuai dengan tabel 4.3.

Tabel 4.3: Keluaran Parameter untuk $V_{DD}/V_{SS} \pm 5$ Volt dan C_L 1800pF

SR(V/uS)	20
S1	1.0055278
S3	30.6
S5	1.855763457
S6	19.213907
S7	2.913548628
Av (Watt)	8722.222222
Pdiss	0.104065056
I_5 (A)	0.00792

Percobaan selanjutnya diberi masukan V_{DD} sebesar 3.3 V, dan V_{SS} sebesar -3.3 Volt. Selanjutnya nilai *Slewrate* diubah-ubah dari 10 V/ μ S hingga 100 V/ μ S dan C_L diubah juga dari 800 pF hingga 2900 pF maka didapat data 1 sampai 23. Dari data yang diolah maka didapat suatu data yang sesuai dengan batasan parameter A_v lebih besar dari 5000, disipasi daya kurang dari 110 mW yang menghasilkan *Slewrate* dan *Gain* (A_v) paling tinggi. Untuk melihat parameter masukan perancangan Op-Amp terlihat pada gambar 4.4. sedangkan untuk hasilnya bisa dilihat pada lampiran B.

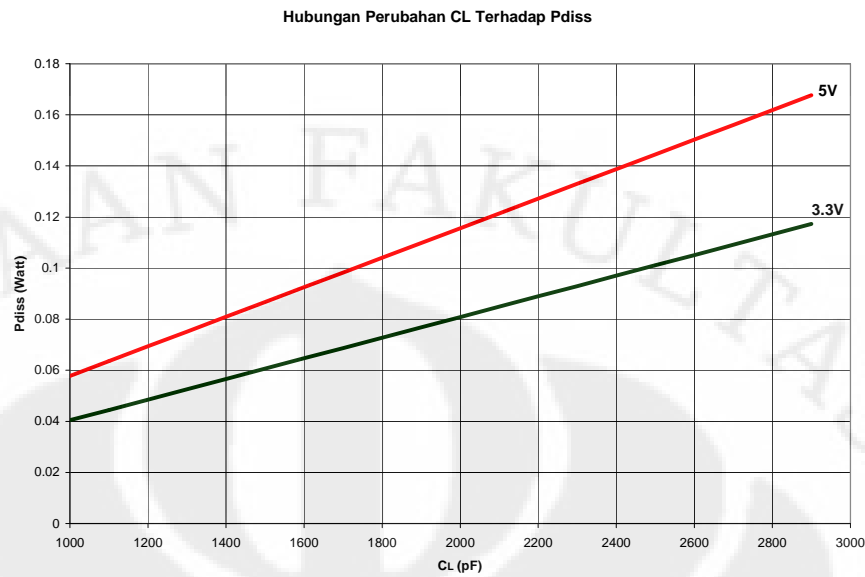
Tabel 4.4: parameter masukan yang digunakan untuk tegangan V_{DD} 3.3

$A_v > (V/V)$	5000
GB (Hz)	5.00E+06
CMR max(Volt)	3.3
Min	-1
CL (piko Farad)	800 – 2900
SR > (V/ μ s)	10 – 100
Vdd (Volt)	3.3
Vss (Volt)	-3.3
Vout range	2.5
	-2.5
Pdiss < (mW)	110

Berdasarkan hasil dari percobaan dengan masukan V_{DD} 3.3 V dan V_{SS} -3.3. didapatkan hasil keluaran yang tertera pada Tabel 4.5 dengan melakukan tahapan seperti pada gambar 4.1 hingga gambar 4.5. dari tahap tersebut didapat nilai *Slewrate* 20 V/ μ s dan C_L 1800 pF

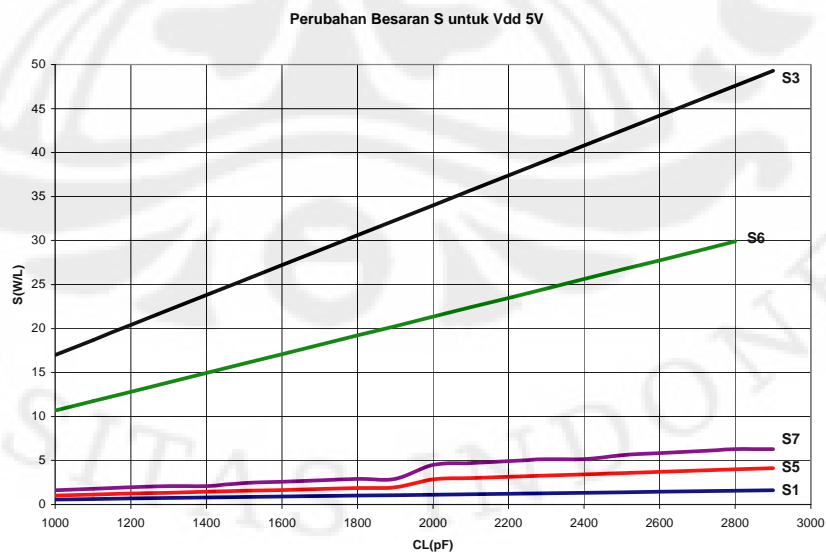
Tabel 4.5: Keluaran Parameter untuk $V_{DD}/V_{SS} \pm 3.3$ Volt dan C_L 1800pF

SR(V/uS)	20
S1	1.0055278
S3	30.59539331
S5	1.095331272
S6	24.01738375
S7	1.719670097
A_v	8722.222222
Pdiss	0.07278876
I5	0.00792

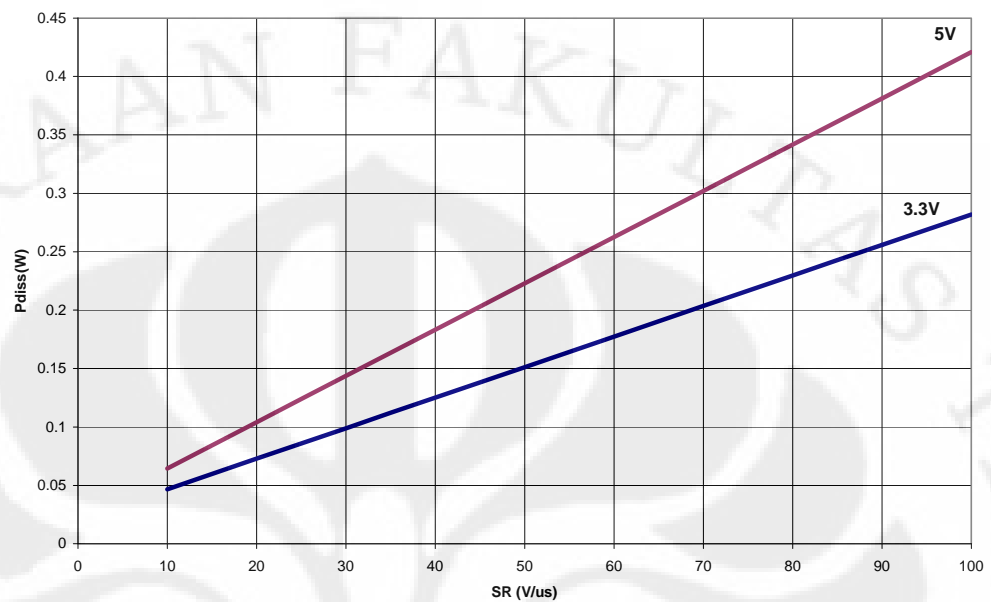


Gambar 4.10: Hubungan perubahan C_L terhadap Disipasi Daya

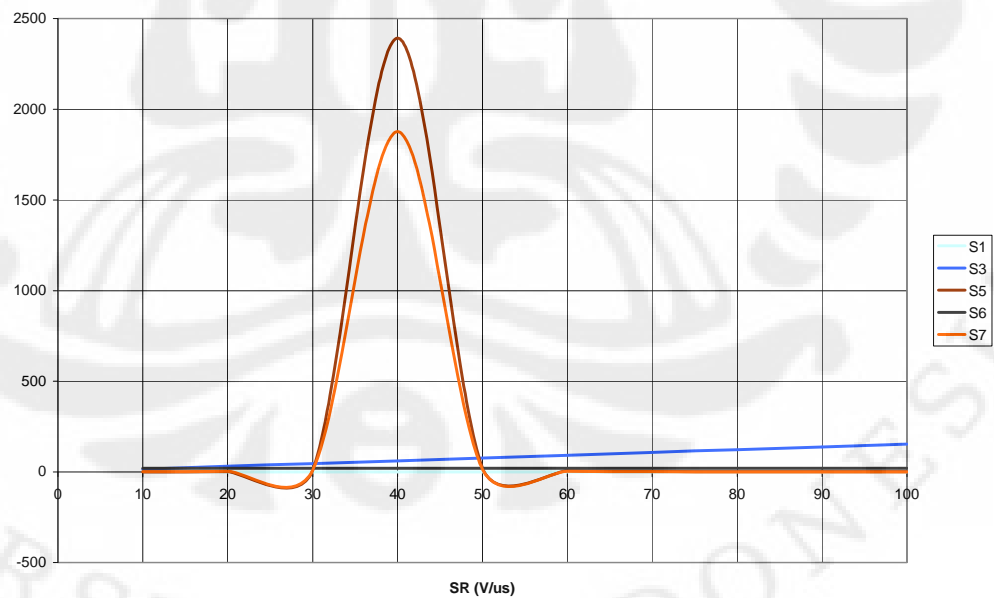
Hasil yang didapat dengan memasukkan tegangan V_{DD} 5V dan V_{DD} 3.3 V. Didapatkan sebuah gambar Untuk gambar 4.10 merupakan perbandingan perubahan C_L terhadap disipasi daya untuk tegangan masukan 5V dan 3.3 V dengan nilai slewrate yang telah ditentukan sesuai dengan tabel 4.3, yaitu 20 V/ μ s. Perubahan tersebut juga berpengaruh terhadap dimensi dari seluruh S yang terlihat pada gambar 4.11 untuk tegangan masukan V_{DD} 5V. Untuk tegangan masukan 3.3 V bisa dilihat pada lampiran B



Gambar 4.11: hubungan perubahan C_L terhadap Besaran S

Hubungan Perubahan P_{diss} terhadap Slew RateGambar 4.12: Hubungan perubahan *Slewrate* terhadap Disipasi Daya

Hubungan Perubahan Antara SR terhadap S

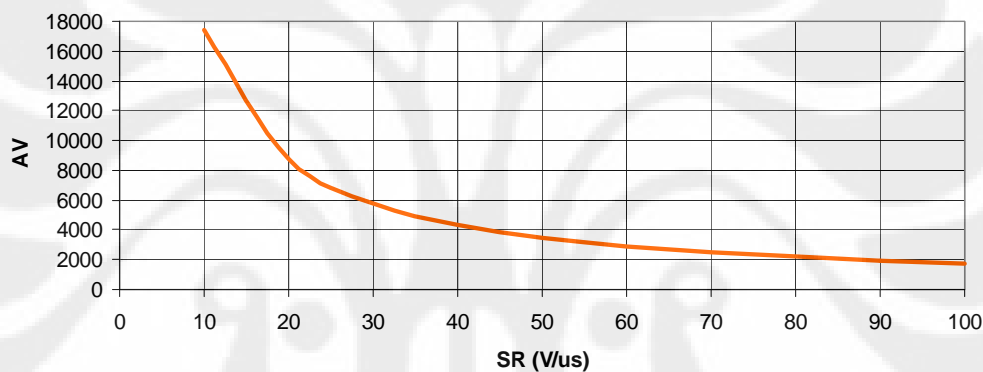
Gambar 4.13: Hubungan perubahan *Slewrate* terhadap S

Selanjutnya dari hasil yang didapat pada tabel 4.3, maka didapat untuk perubahan Slewrate terhadap disipasi daya untuk nilai C_L yang tetap yaitu

1800 pF. Maka didapatkan besaran keluaran seperti yang tertampil pada gambar 4.12 untuk tegangan masukan V_{DD} 5V dan 3.3V. Sedangkan gambar 4.13 menggambarkan kurva untuk perubahan Slewrate terhadap nilai S pada tegangan 5 V. Untuk 3.3 Volt bisa dilihat pada lampiran B.

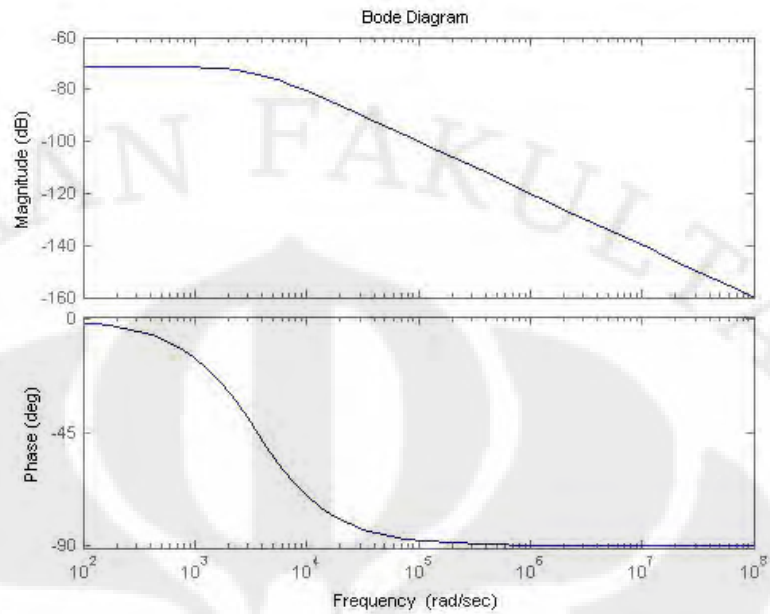
Selanjutnya berdasarkan tabel 4.3 dan tabel 4.5 diatas didapat bahwa nilai C_L bernilai 1800 pF, dan *Slewrate* yang didapat sebesar 20 V/ μ S sedangkan disipasi dayanya untuk Vdd 5V didapat 104 mW, untuk Vdd 3.3V didapat 72 mW. Sedangkan untuk perubahan *Slewrate* terhadap A_V tidak dipengaruhi terhadap besaran masukan dari V_{DD} seperti yang ditampilkan pada gambar 4.14.

Hubungan Perubahan C_L terhadap A_V untuk 3.3V dan 5V

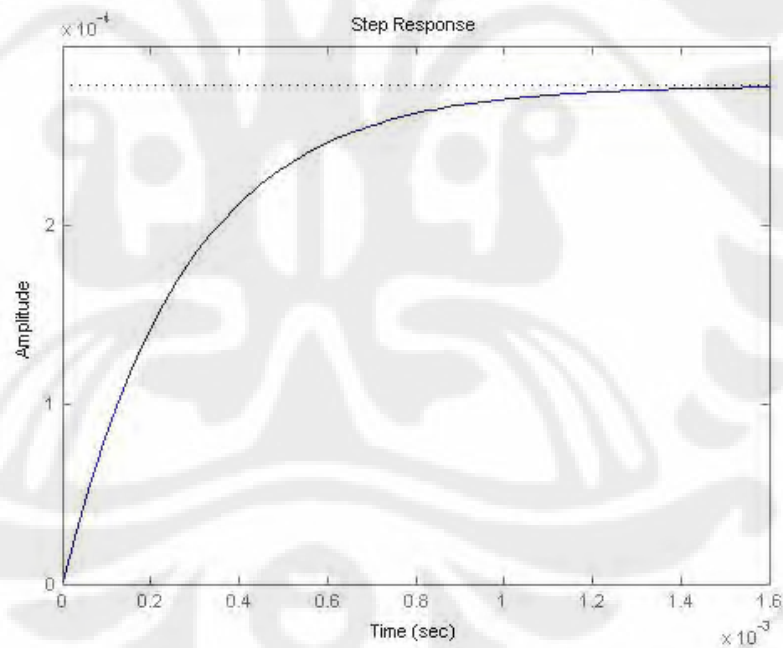


Gambar 4.14: Hubungan perubahan *Slewrate* terhadap A_V

Dari kedua hasil tegangan masukan 3.3V dan 5V didapat data yang bisa dilihat tingkat kestabilannya dari respons sistem dan diagram bodinya berdasarkan nilai tegangan yang sesuai dengan gambar 4.15(a) dan gambar 4.15(b)



Gambar 4.15(a), Hasil diagram bode untuk Vdd 5 V dan 3.3 V dengan menggunakan Matlab 7.0



Gambar 4.15(b), Hasil Respons Sistem untuk Vdd 5 V dan 3.3 V dengan menggunakan Matlab 7.0

Selanjutnya menentukan frekuensi yang diperkenankan agar mendapatkan keluaran yang diinginkan. Hubungan ini terjadi antara *Slewrate* dengan Frekuensi. Keluaran yang dimaksud adalah pergeseran fasa antara sinyal masukan dengan

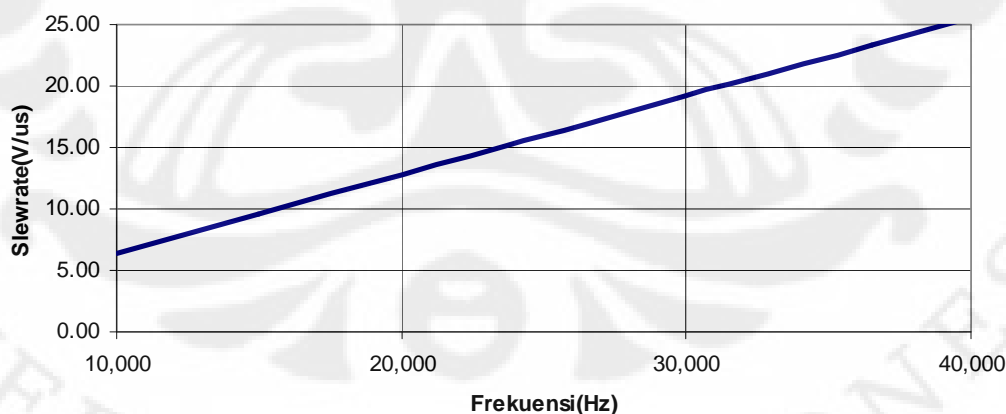
sinyal keluaran. Pergeseran fasa memiliki tingkat ketelitian yang diatur berdasarkan besaran periodanya.

Dari gambar 4.17 *Slewrata* yang telah ditentukan yaitu sebesar $20 \text{ V}/\mu\text{s}$, maka tingkat ketelitian yang didapat untuk frekuensi 30 KHz adalah sebesar 0.7° untuk tegangan masukan 5V dan 0.46° untuk tegangan masukan 3.3 V. Untuk nilai 5 V didapat nilai maksimum frekuensinya adalah 31 KHz, sedangkan untuk yang 3,3 V didapat nilai maksimum frekuensinya adalah 31.5 KHz. Untuk grafik 3.3 V terlihat pada lampiran B.

Tabel 4.6. kurva perubahan Slewrata terhadap frekuensi

Freq(Hz)	Periode (S)	SR (V/ μs)
10,000	0.0001	6.40
15,000	6.6667E-05	9.60
20,000	0.00005	12.80
25,000	0.00004	16.00
30,000	3.3333E-05	19.20
35,000	2.8571E-05	22.40
40,000	0.000025	25.60
45,000	2.2222E-05	28.80
50,000	0.00002	32.00

Kurva Perbandingan Slewrata terhadap frekuensi



Gambar 4.16, Kurva perbandingan *slew rate* dan FPBW

4.3 Analisa data

Penentuan kapasitor *Load* (C_L) sebesar 1800 pF dilakukan dengan cara merubah-ubah besaran dari C_L yang dimulai dari 800 pF hingga 2900 pF dengan skala 100. Perubahan nilai C_L juga di iringi dengan penambahan nilai *Slewrates* yang berubah dari 10 V/ μ s hingga 100 V/ μ s dengan skala 10.

Perubahan nilai dari *Slewrates* yang semakin tinggi akan menyebabkan tidak tercapainya syarat untuk perbandingan W dan L seperti yang tertampil pada gambar 4.11, dengan mengacu pada syarat perbandingannya adalah bernilai ≥ 1 . Jika nilai S (W/L) kurang dari 1 akan menyebabkan besarnya hambatan untuk sebuah MOS. Sebab untuk menentukan nilai dari resistansi untuk sebuah MOS mengacu pada persamaan dibawah ini.

$$S = \frac{g_m^2}{K' I_d} \quad (4.1)$$

$$I_d \cong g_m \times V_{ds} \quad (4.2)$$

Jadi

$$R = \frac{1}{g_m} \quad (4.3)$$

Pada gambar 4.2 diatas didapat bahwa nilai dari S_3 dan S_6 memiliki nilai yang lebih besar daripada S_1 , S_5 , S_7 . hal ini disebabkan oleh S_3 merupakan sebagai fungsi masukan op amp yang biasanya dikenal dengan tegangan referensi. Sedangkan S_6 merupakan fungsi keluaran. Sebagai fungsi keluaran haruslah memiliki nilai resistansi yang kecil, sebab dari data sheet LM741 nilai hambatan luar sama dengan 0. Begitu pula dengan nilai S_3 . Pada S_3 harus dapat dilalui oleh arus yang berasal dari V_{DD} .

Pada gambar 4.4 ditemukan bahwa pada *Slewrates* bernilai 40 didapat nilai S_5 yang begitu besar. Hal ini disebabkan oleh nilai V_{ds5} yang dibawah persyaratannya.

$$V_{DS5}(sat) = v_{in}(\min) - V_{ss} - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} - V_{T1}(\max) \geq 100 \text{ mV} \quad (4.4)$$

Perbedaan tegangan masukan memberikan perbedaan pada disipasi daya yang bernilai 104 mW untuk tegangan masukan 5V. Sedangkan untuk tegangan masukan 3.3V mendapatkan disipasi daya sebesar 72mW.

Perbedaan tegangan masukan tidak mempengaruhi penguatan op-amp. Penguatan opamp yang didapat dari dua buah masukan seperti yang tertampil pada tabel 4.3 dan 4.5 adalah sebesar 8722. dari besarnya penguatan dapat ditentukan CMRR (Common Mode Rejection Ratio) yaitu:

$$CMRR = 20 \log \frac{A_{ol}}{A_{cm}} \quad (4.5)$$

Dari persamaan 4.5 didapatkan nilai CMRR untuk kedua perbedaan masukan. CMRR untuk keduanya adalah $20 \log 8722$ jadi 78 dB.

Hasil data yang didapat pada tabel 4.3 dan tabel 4.5 dapat ditentukan kestabilannya yang bisa ditentukan dengan beberapa metode. Tetapi pada percobaan ini dibatasi dengan mencari kestabilan berdasarkan metode Bode. Dari kedua perbedaan masukan tersebut terdapat kesamaan nilai Pole – Zero.

Pole1 bernilai -3600, sedangkan untuk Pole2 bernilai -69080000. sistem itu juga memiliki Zero yang bernilai -69080000. sehingga bentuk persamaannya menjadi:

$$H(S) = \frac{(S + 69080000)}{(S + 3600)(S + 69080000)} \quad (4.6)$$

Maka dari persamaan diatas dan grafik bode-nya, bisa dinyatakan bahwa opamp yang dirancang bersifat stabil.

BAB 5

PENUTUP

Pada bagian ini berisikan tentang kesimpulan yang didapat dari hasil percobaan dan analisa pada rangkaian *Operating Amplifier* dua tingkat. Antara lain:

5.1. Kesimpulan

1. Untuk Merancang *Operational Amplifier* yang memiliki *Slew Rate* yang diinginkan dapat diubah menjadi bentuk rangkaian *Operational Amplifier* yang lain
2. Memperbesar nilai dari kapasitan *Load* akan membuat besarnya Arus *Tail* juga semakin bertambah jika nilai dari *Slew rate* tetap. Tetapi dapat mempengaruhi hasil dari respon frekuensi
3. Penambahan jumlah *Slew Rate* berbanding Terbalik dengan *Gain*. Tetapi jika nilai *Slew Rate* melebihi dari batasnya akan mengakibatkan penurunan *Gain* yang cukup signifikan. Hal ini terjadi juga pada koefisien S3.
4. Maksimum *Slew Rate* pada parameter bernilai 20 V/ μ s. Jika nilai maksimum dari *Slew Rate* ingin ditambah perlu dilakukan modifikasi dari parameter MOS dan jenis rangkain Op-Amp.
5. Perbesaran nilai *Gain* akan menyebabkan nilai S1 dan S7 akan bertambah besar pula. Hal ini juga diikuti oleh penambahan P_{diss} dan *Gain*.
6. Memasukkan nilai *Slew Rate* yang melebihi dari batas maksimal akan menyebabkan perbandingan panjang dan lebar dari MOS menjadi besar. Sehingga V_{DS} yang berada di MOS 5 dapat bernilai Negatif
7. Penambahan *Gain Bandwidth* akan berakibat pada penambahan dissipasi daya.

5.2. Saran

1. Pada percobaan kali ini hanya bisa dilakukan dengan kemungkinan-kemungkinan yang terjadi tanpa mengetahui bagaimana kondisi pada saat di fabrikasi

2. Melakukan Studi literatur lebih dalam lagi agar mendapatkan parameter-parameter yang sesuai dengan kehendak
3. Dapat melakukan simulasi dengan PSPICE sebagai program pembantu yang dapat menghasilkan parameter-parameter dari Rangkaian *Operational Amplifier* Dua Tingkat



DAFTAR ACUAN

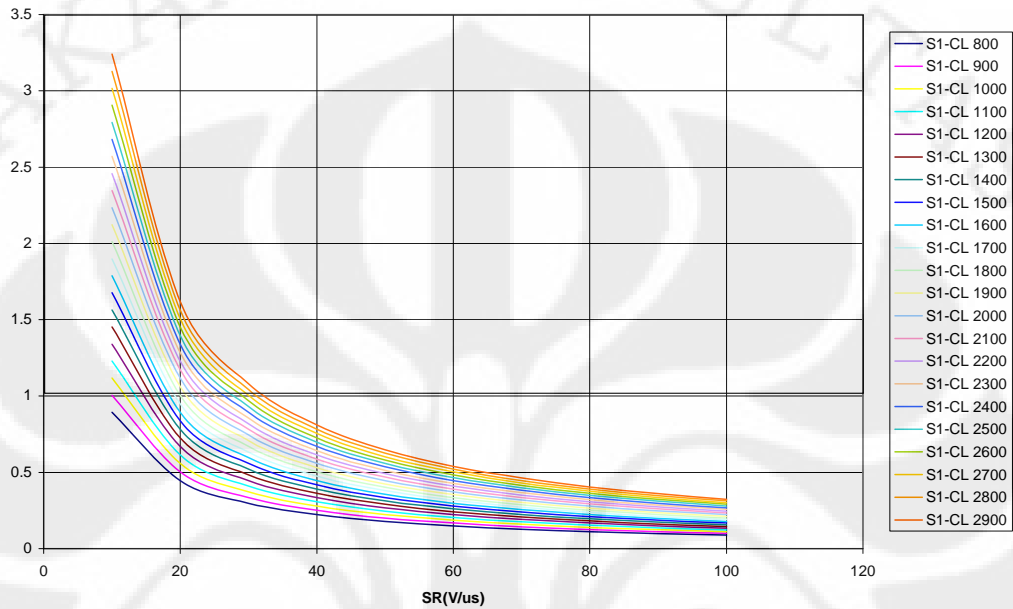
- [1] Boylestad, Robert.L.(2006).*Electronics Devices and Circuit Theory*.New Jersey:Pearson Education International.
- [2] Millman, Jacod and Grabel,Arvin.(1987).*Microelectronics second edition*.New York:McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- [3] Zuhaf Prof. Dr. M.Sc.EE & Ir. Zhanggischan.(2004). *Prinsip Dasar Elektroteknik*. Jakarta: Gramedia.
- [4] Howe, Roger T and Charles G.Sodini.(1997). *Microelectronics An Integrated Approach*. New Jersey: Prentice Hall and VLSI Series.
- [5] Jung, Walt.(2005).*Op Amp Applications Handbook*.Oxford:Analog Devices.
- [6] Hayt, William.H & Buck, John.A.(2006).*Engineering Electromagnetics, Seventh Edition*.New York:McGraw-Hill.
- [7] Penjelasan Bapak Dr.Ir. Agus Santoso Tamsir, M.T.
- [8] Sze, S.M.(2002).*Circuit Semiconductor Devices Physics And Technology*.New York:John Wiley & Sons.
- [9] Allen, Philips E & Holberg, Douglas R.(1987). *CMOS Analog Circuit Design*.New York:Holt, Rinehart and Winston.
- [10] Two Stage Op-Amp Design.
[http://users.ece.gatech.edu/~pallen/Academic/ECE_6412/Spring_2004/L160-MOSOpAmpDesign\(2UP\).pdf](http://users.ece.gatech.edu/~pallen/Academic/ECE_6412/Spring_2004/L160-MOSOpAmpDesign(2UP).pdf)
- [11] Hamonangan, Aswan. *Operational Amplifier Karakteristik Op-Amp*. ITB
- [12] Donc, Tolga.(2008).Analog Integrated Circuits Design Project. Sabanci University.
- [13] Alif, Taufik.(2009). *Optimisasi Rangkaian Detektor Fasa Frekuensi Rendah Sebagai Rangkaian Pembaca Keluaran Sensor Kelembaban dan Konduktivitas Elektrik*.Depok:UI

DAFTAR PUSTAKA

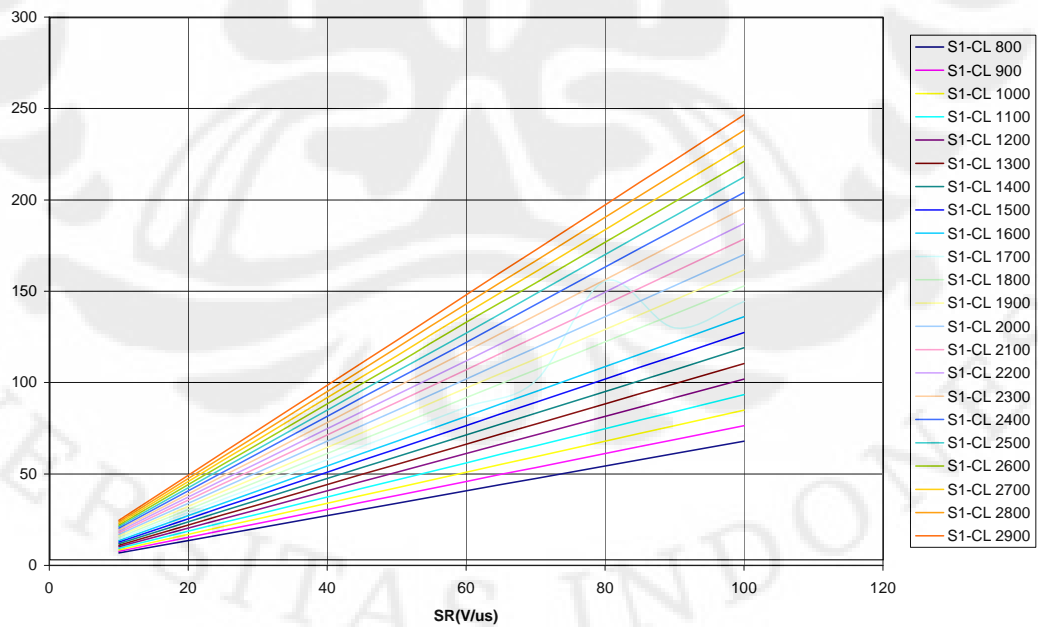
- Burr-Brown Products.(2000). *OPA2652 Dual, 700MHz, Voltage-Feedback OPERATIONAL AMPLIFIER*.USA:Burr-Brown Corporation.
- Burr-Brown Products.(2005).*High Precision Operational Amplifiers OPA277, OPA2277, OPA4277*.Texas Instruments.
- Carter, Bruce,. Brown,Thomas.R.(2001).*Handbook of Operational Amplifier Applications*.Application Report:Texas Instrumen.
- Clayton,George.,Winder,Steve.(2003).Operational Amplifiers.Kidlington:Elsevier Ltd.
- G. Fink, Donald (ed).(1975).*Electronic Engineers Handbook*. New York: McGraw Hill.
- Horowitz, Paul and Hil, Winfieldl.(1989).*The Art of Electronics 2nd Ed*. Cambridge:Cambridge University Press.
- Hughes,Frederick.W.(1981).*Op Amp Handbook*.London:Prentice-Hall.
- Linear Technology.*LTC1051/LTC1053Dual/Quad Precision Chopper Stabilized Operational Amplifiers With Internal Capacitors*. USA:Linear Technology Corporation.
- Linear Technology.(2000). *LT1886 Dual 700MHz, 200mA Operational Amplifier*. USA:Linear Technology Corporation.
- Millman, Jacod and Grabel,Arvin.(1987).*Microelectronics second edition*.New York:McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- National Semiconductor.(1999).*LM675 Power Operational Amplifier*.National Semiconductor Corporation.
- R.F.Coughlin and F.F.Driscoll.(1977).*Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits*.New York:Prentics-Hall.
- Tobey,Graamea,Huelsman.(1971).Operational Amplifier Design and Applications.New Delhi:McGRAW-HILL KOGAKUSHA,LTD.

Lampiran A : Keluaran Operational
Amplifier 5V

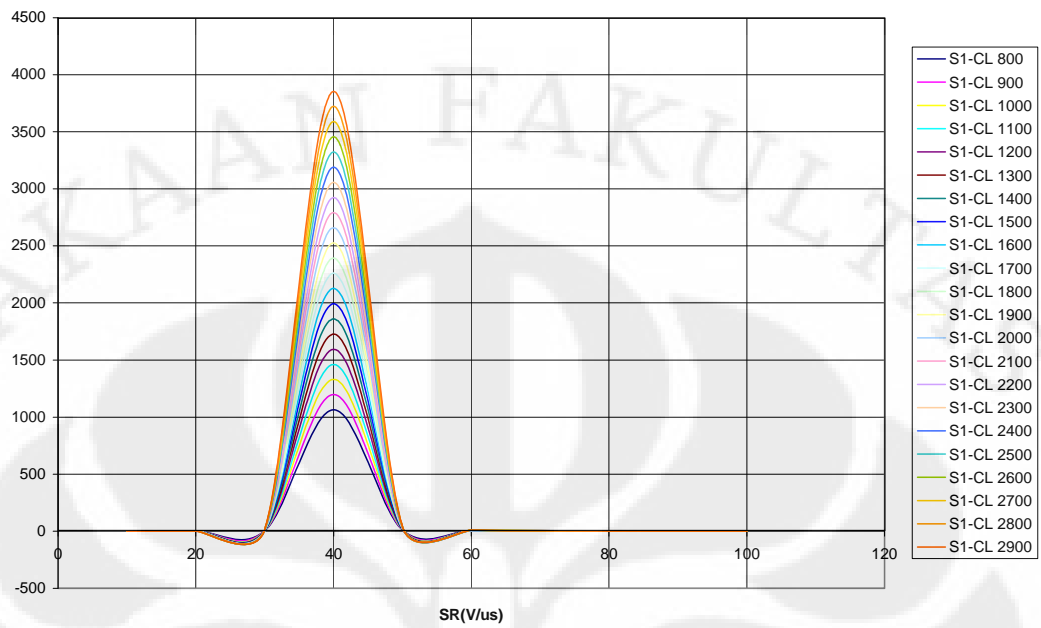
Perubahan SR terhadap S1



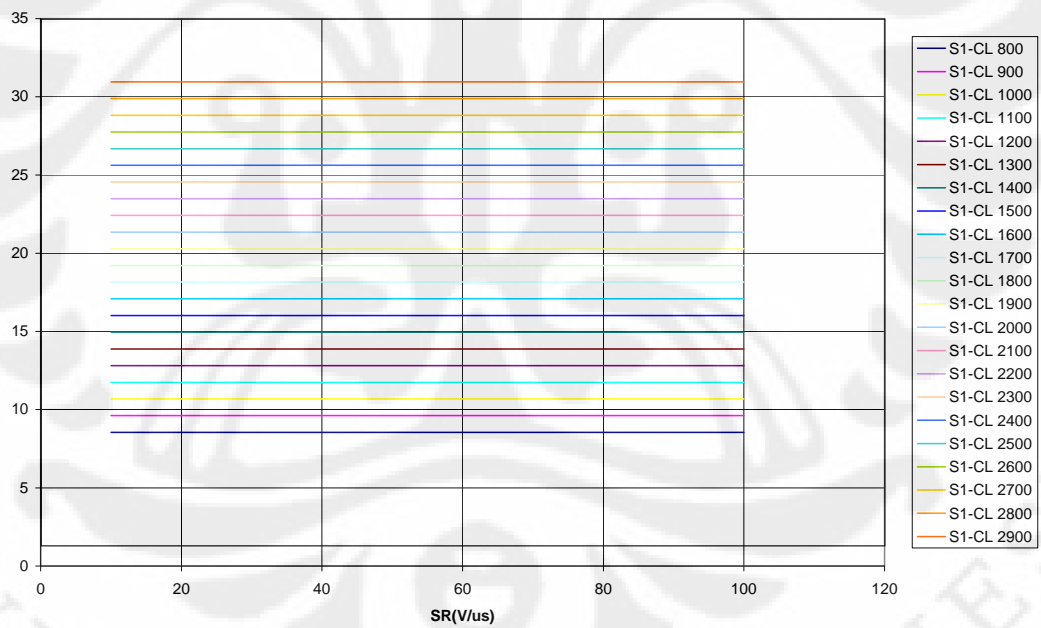
Perubahan SR terhadap S3



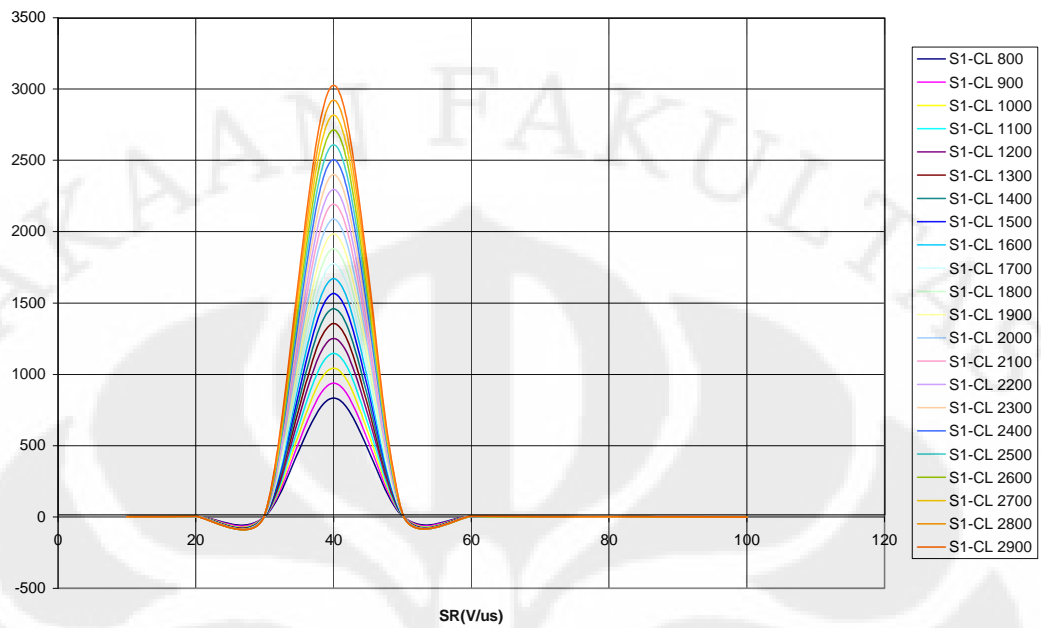
Perubahan SR terhadap S5



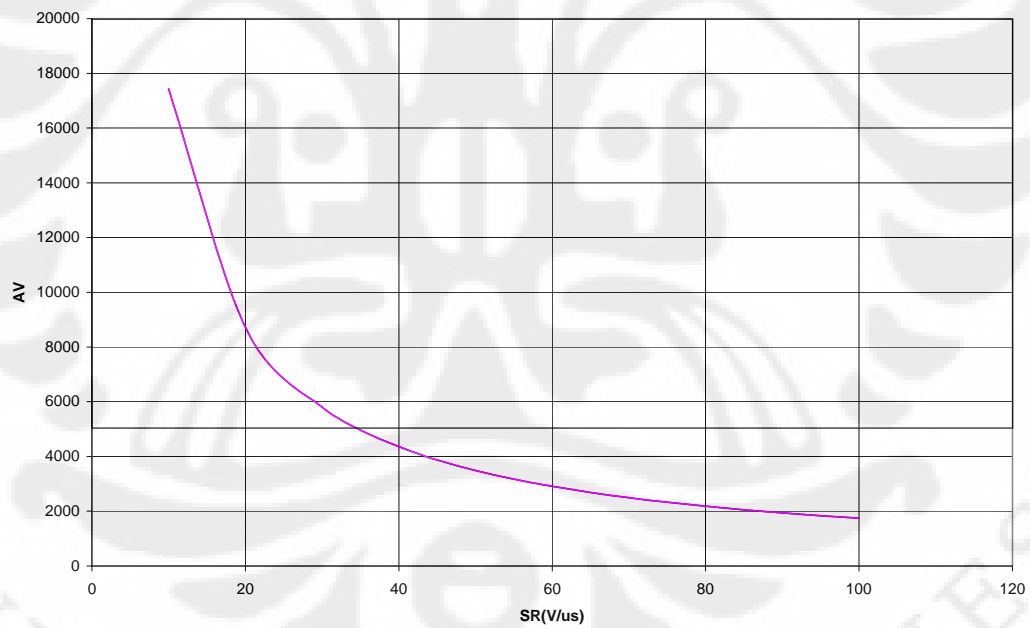
Perubahan SR terhadap S6



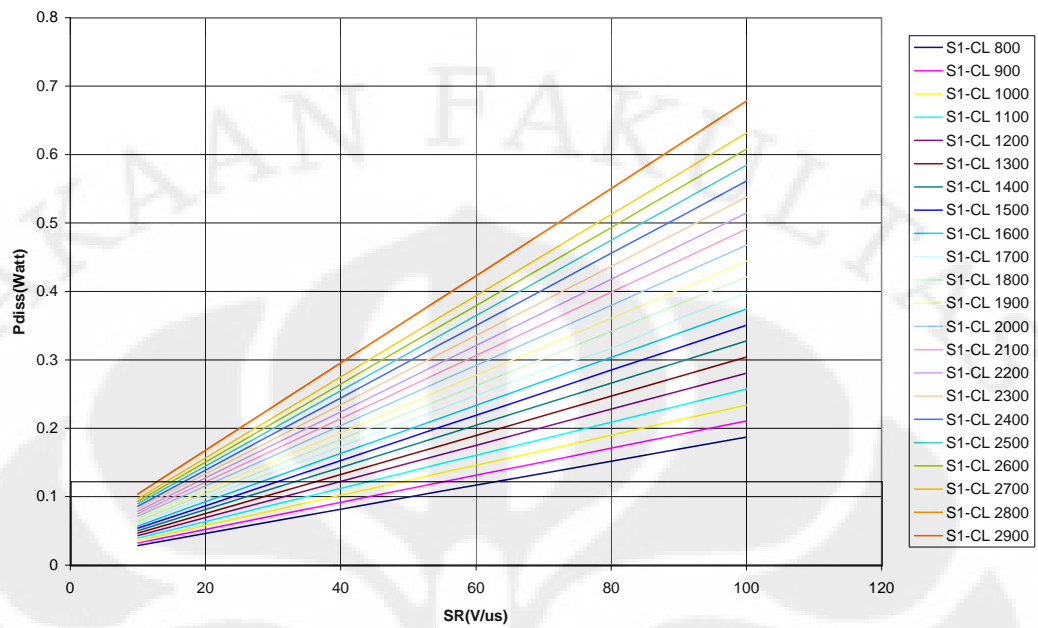
Perubahan SR terhadap S7



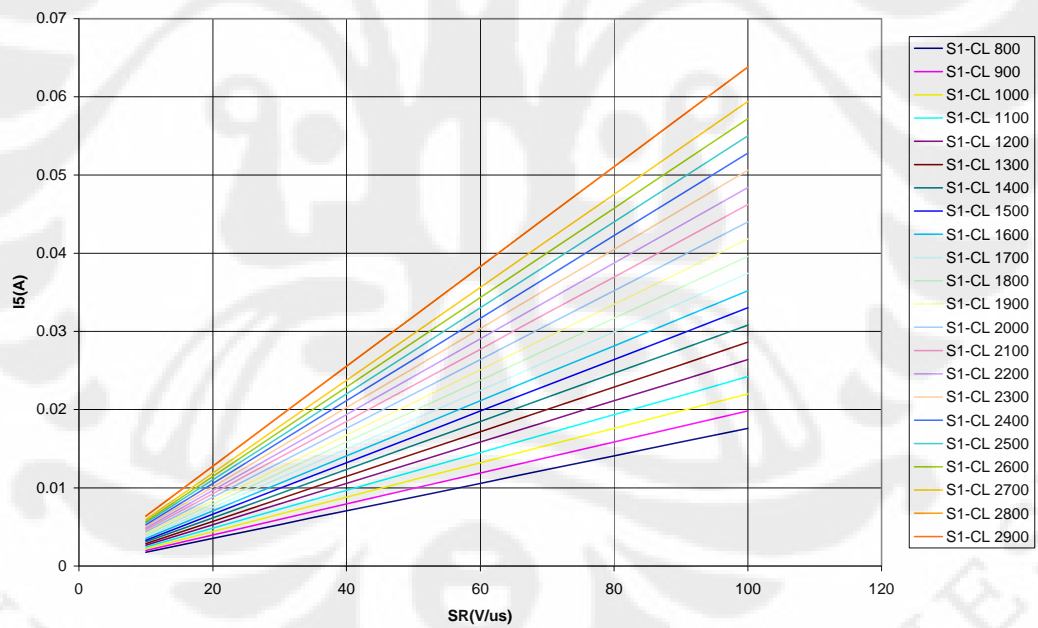
Perubahan SR terhadap AV



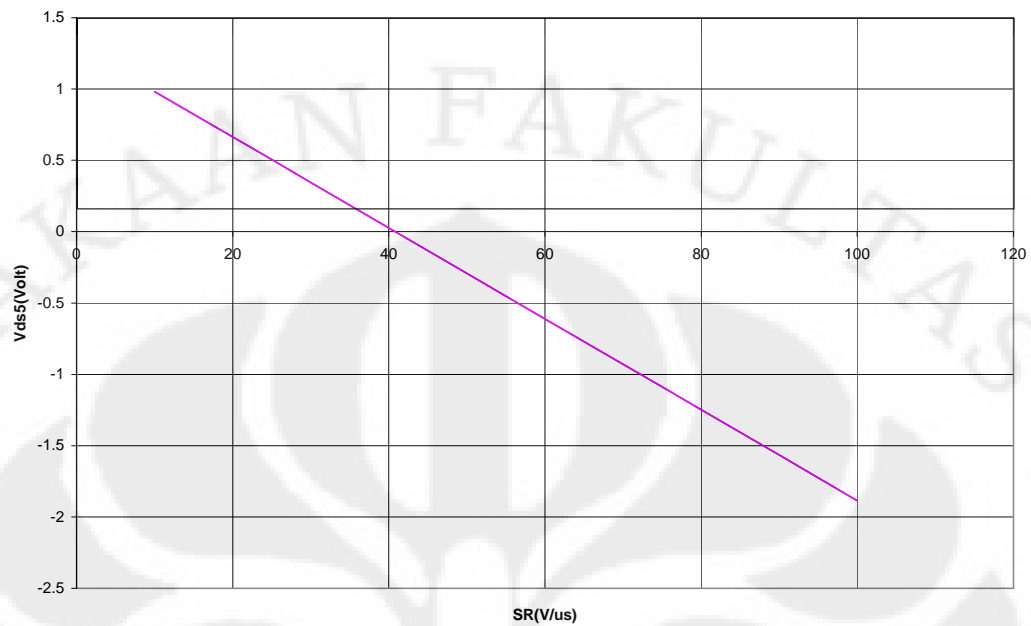
Perubahan SR terhadap S7



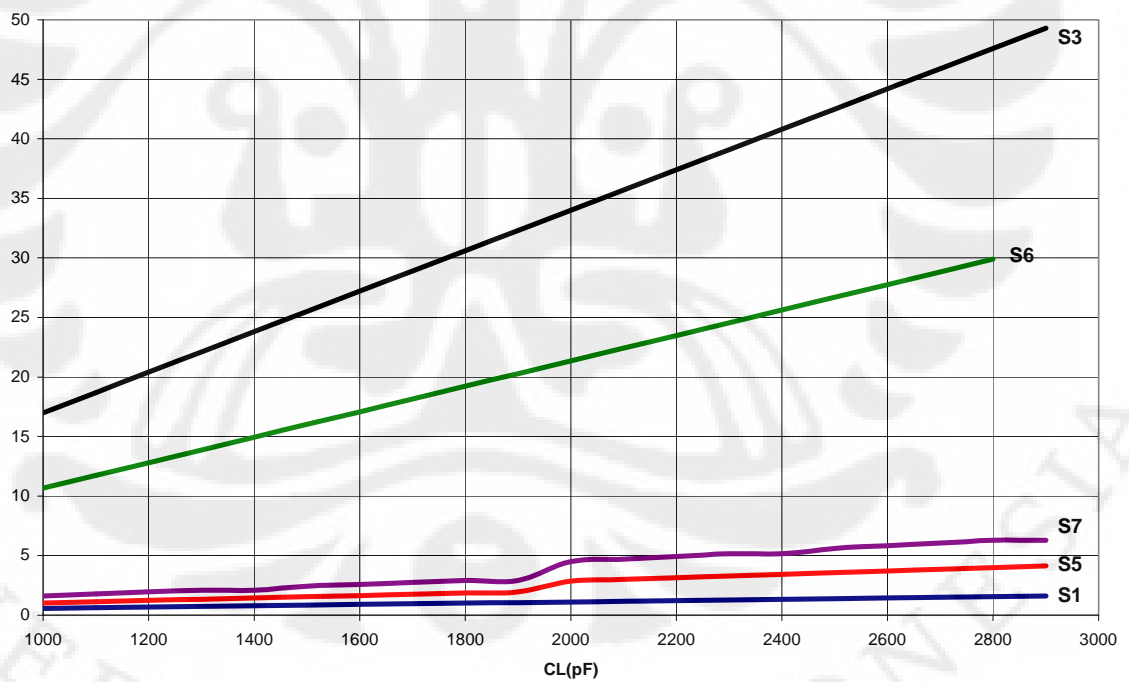
Perubahan SR terhadap I5



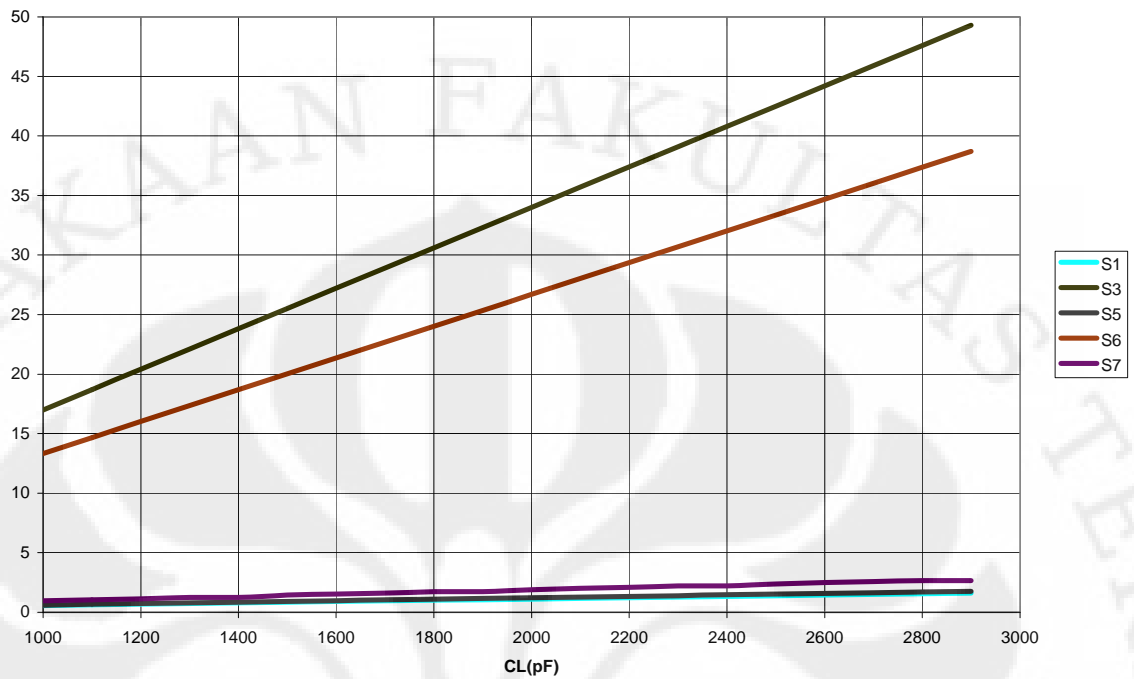
Perubahan SR terhadap Vds5



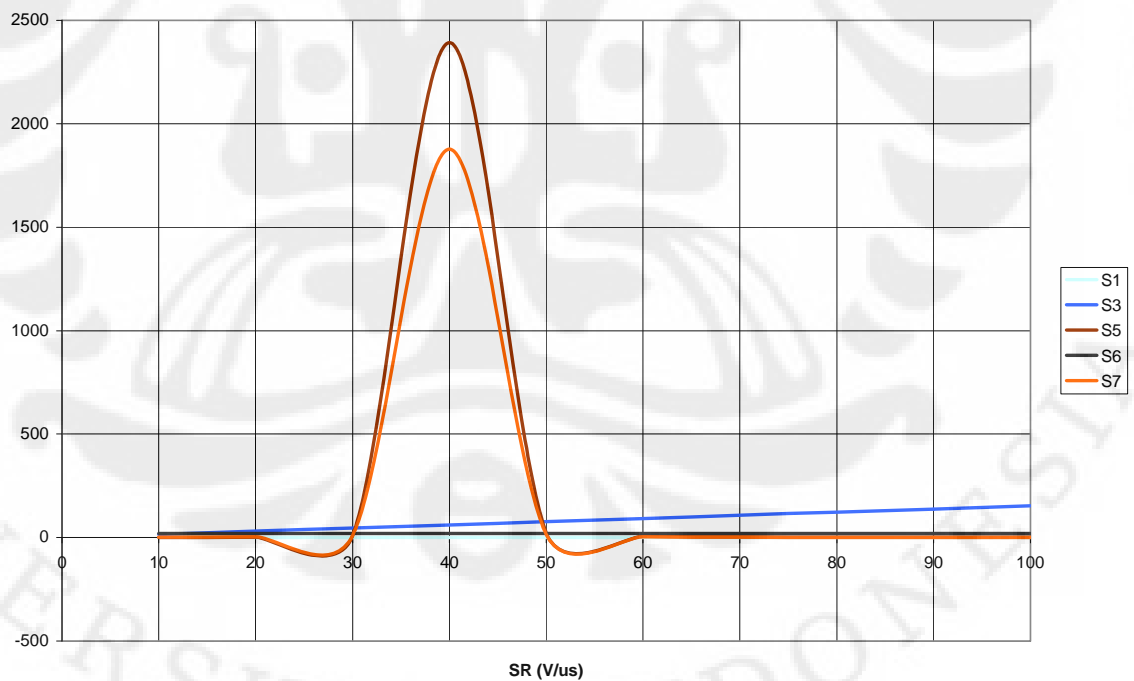
Perubahan Besaran Suntuk Vdd 5V



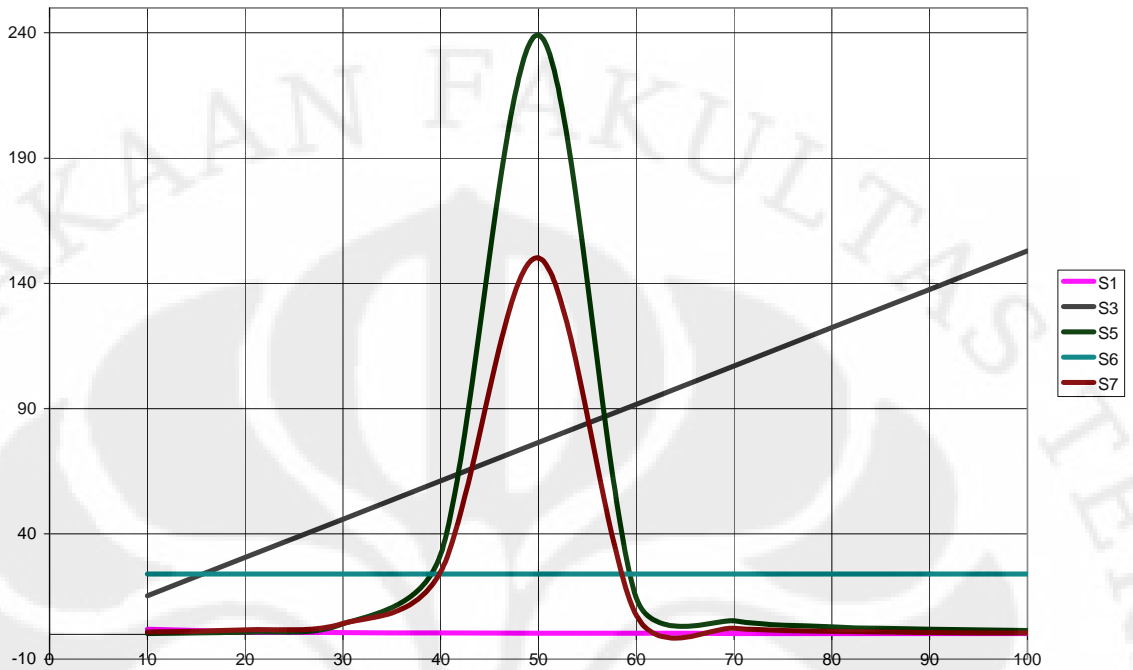
Perubahan Besaran S untuk Vdd 3.3V



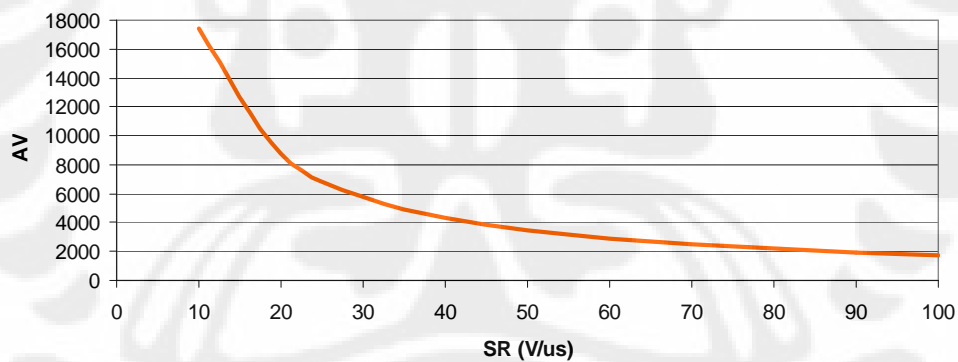
Hubungan Perubahan Antara SR terhadap S Vdd 5V



Perubahan S thd Pdiss Vdd 3.3 V



Hubungan Perubahan CL terhadap AV untuk 3.3V dan 5V

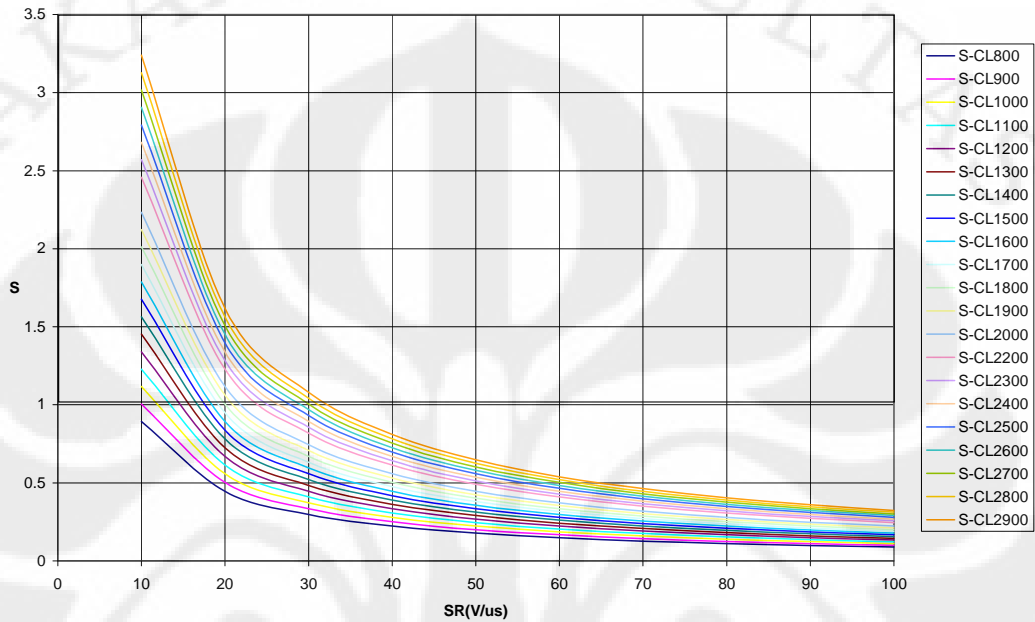


Perbandingan W dan L

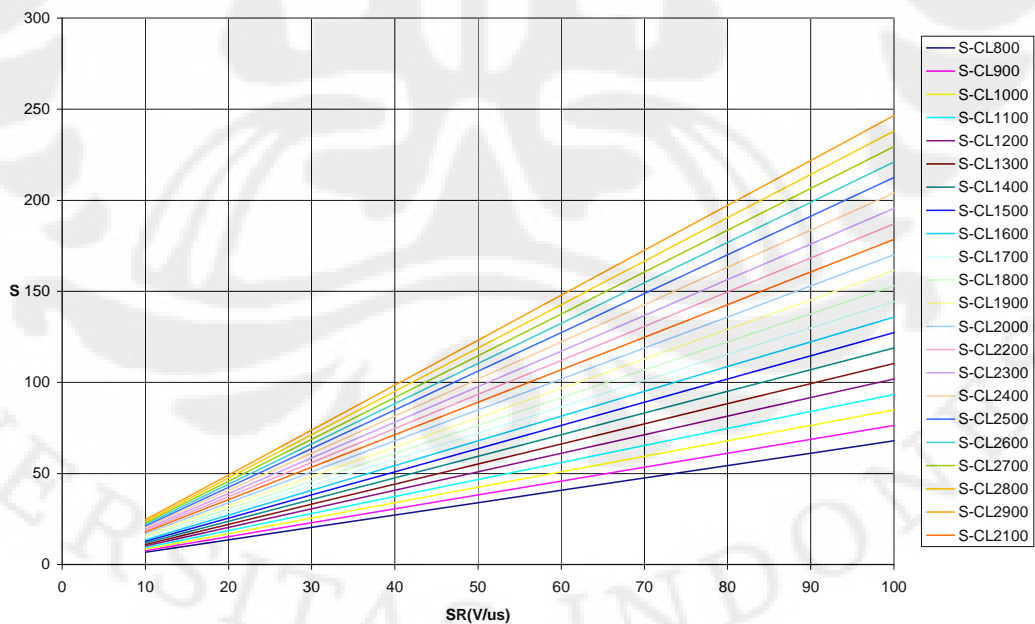
	5V	3.3V
CL = 1800 pF		
SR(V/uS)	20	20
S1	1.0055	1.01E+00
S3	30.6	30.6
S5	1.8558	1.095331272
S6	19.214	2.40E+01
S7	2.9135	1.72E+00
Av	8722.2	8722.222222
Pdiss	0.1041	0.072785671
L = 0.4 μ m		
Ld = 0.09 μ m		
W1 (μ m)	0.402211	0.40221112
W3 (μ m)	12.24	12.24
W5 (μ m)	0.742305	0.438132509
W6 (μ m)	7.685563	9.606953498
W7 (μ m)	1.165419	0.687868039

Lampiran B : *Keluaran Operational*
Amplifier 3.3 V

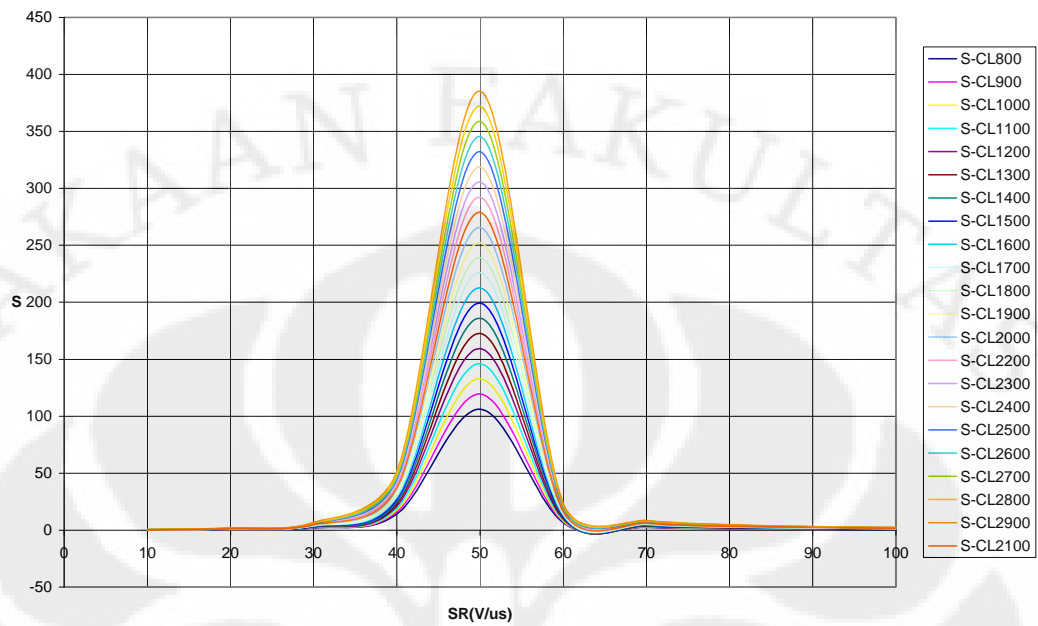
Perubahan SR & CL terhadap S1



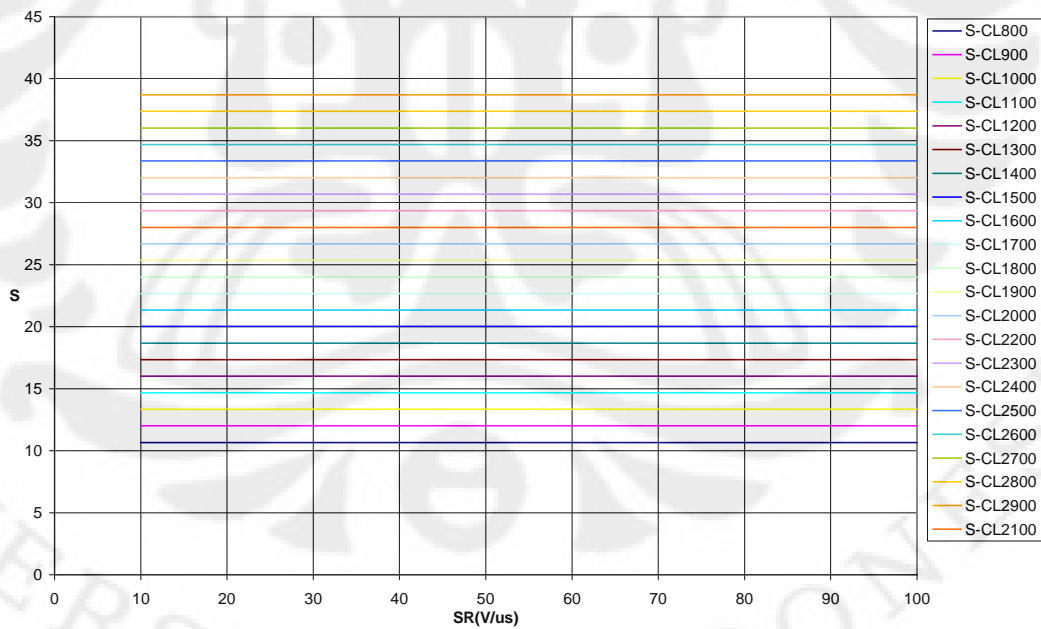
Perubahan SR & CL terhadap S3



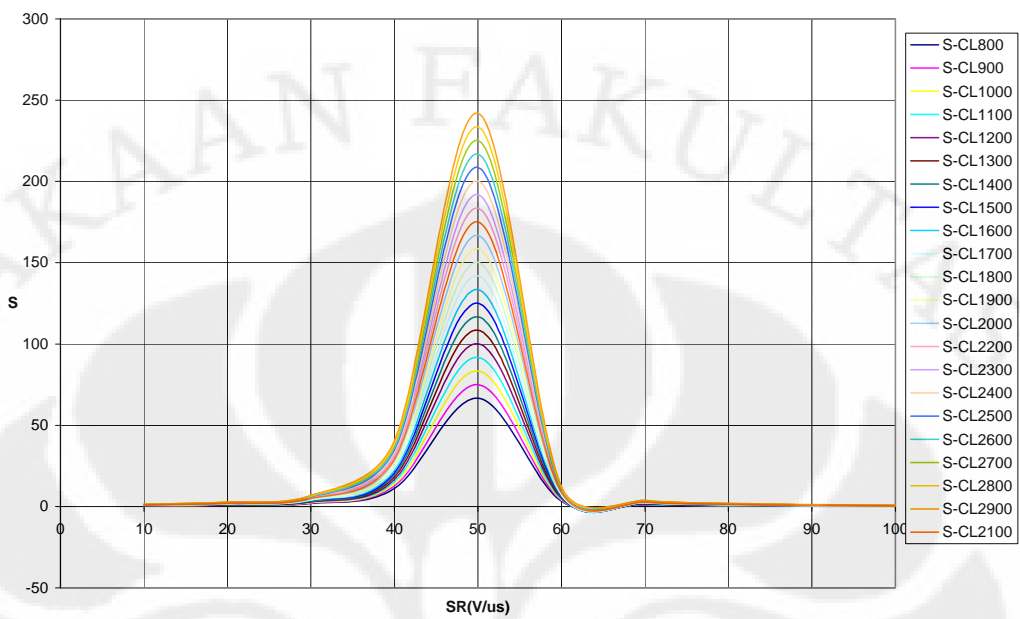
Perubahan SR & CL terhadap S5



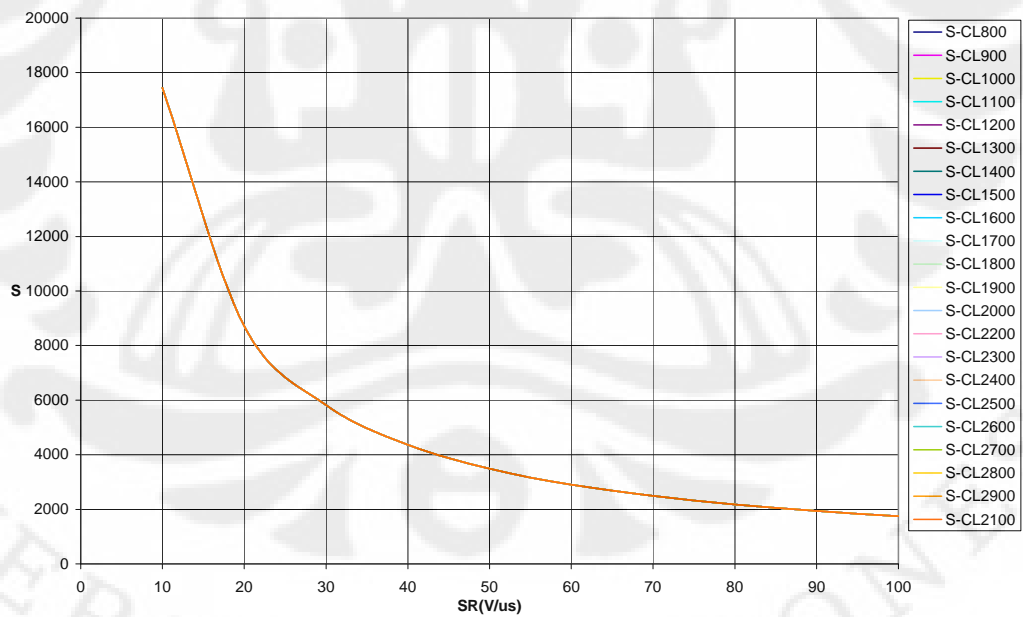
Perubahan SR & CL terhadap S6



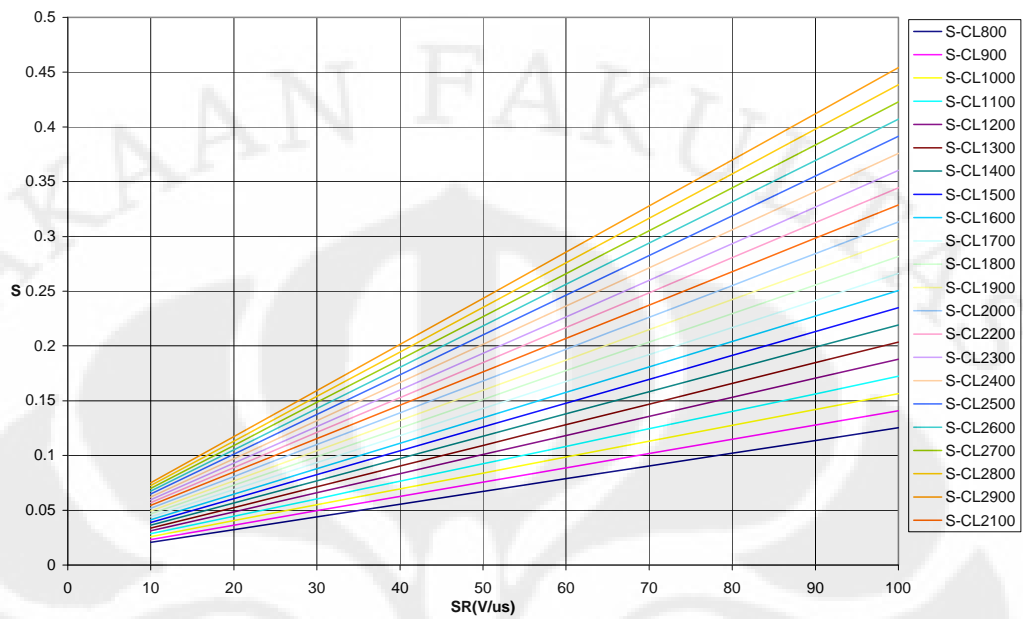
Perubahan SR & CL terhadap S7



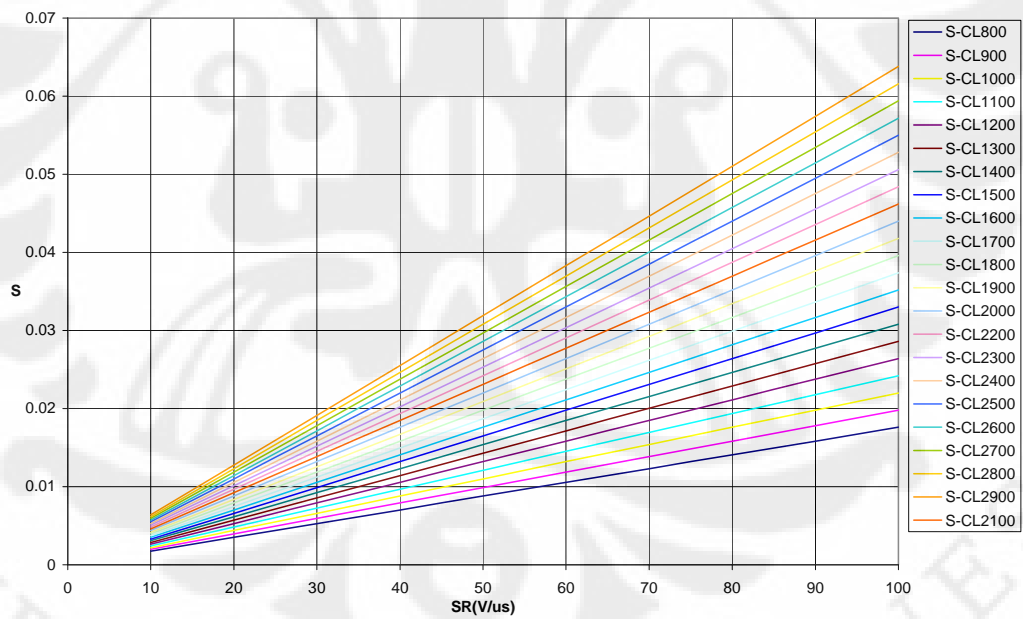
Perubahan SR & CL terhadap Av



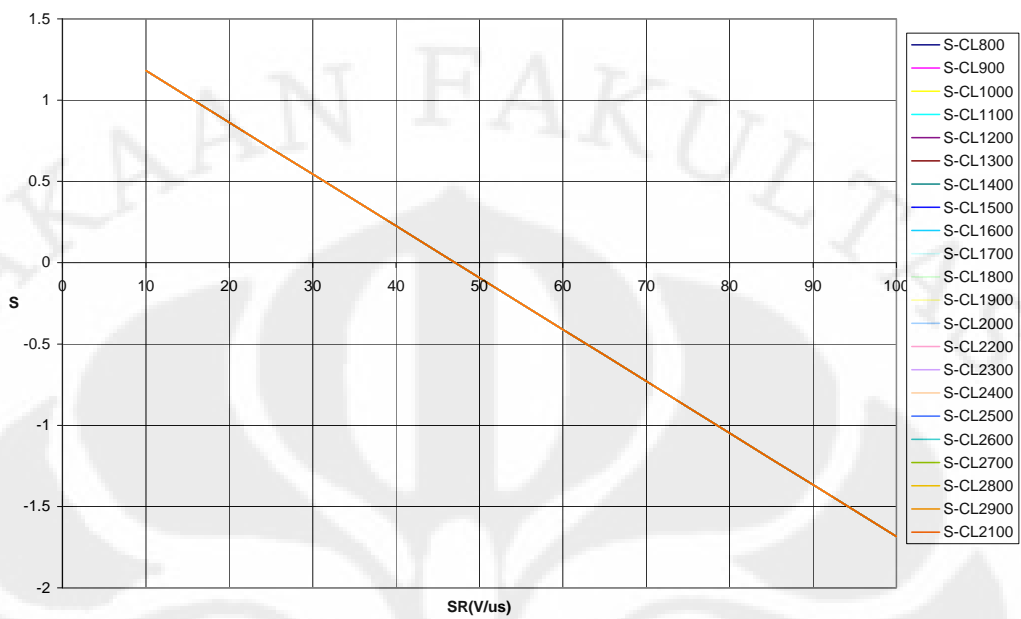
Perubahan SR & CL terhadap P dissipasi



Perubahan SR & CL terhadap I5



Perubahan SR & CL terhadap Vds 5



CL 800pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)											
S1	0.893802488	0.446901244	0.297934163	0.223450622	0.178760498	0.148967081	0.12768607	0.111725311	0.099311388	0.089380249	
S3	6.798976291	13.59795258	20.39692887	27.19590516	33.99488145	40.79385774	47.59283403	54.39181032	61.19078661	67.98976291	
S5	0.129874454	0.486813899	1.834005311	14.1845267	106.2785361	6.445303685	2.386154886	1.321203593	0.87417721	0.638793092	
S6	10.67439278	10.67439278	10.67439278	10.67439278	10.67439278	10.67439278	10.67439278	10.67439278	10.67439278	10.67439278	
S7	0.407805787	0.764297821	1.919592226	11.13485346	66.74292066	3.373042262	1.070360906	0.51857241	0.304990716	0.200581031	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.02073456	0.03235056	0.04396656	0.05558256	0.06719856	0.07881456	0.09043056	0.10204656	0.11366256	0.12527856	
I5	0.00176	0.00352	0.00528	0.00704	0.0088	0.01056	0.01232	0.01408	0.01584	0.0176	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL 900pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)											
S1	1.0055278	0.5027639	0.335175933	0.25138195	0.20110556	0.167587967	0.143646829	0.125690975	0.111725311	0.10055278	
S3	7.648848327	15.29769665	22.94654498	30.59539331	38.24424163	45.89308996	53.54193829	61.19078661	68.83963494	76.48848327	
S5	0.146108761	0.547665636	2.063255975	15.95759253	119.5633531	7.250966645	2.684424247	1.486354043	0.983449361	0.718642229	
S6	12.00869187	12.00869187	12.00869187	12.00869187	12.00869187	12.00869187	12.00869187	12.00869187	12.00869187	12.00869187	
S7	0.45878151	0.859835049	2.159541254	12.52671014	75.08578574	3.794672544	1.204156019	0.583393962	0.343114555	0.22565366	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.02332638	0.03639438	0.04946238	0.06253038	0.07559838	0.08866638	0.10173438	0.11480238	0.12787038	0.14093838	
I5	0.00198	0.00396	0.00594	0.00792	0.0099	0.01188	0.01386	0.01584	0.01782	0.0198	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL 1000pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)											
S1	1.12E+00	5.59E-01	3.72E-01	2.79E-01	2.23E-01	1.86E-01	1.60E-01	1.40E-01	1.24E-01	1.12E-01	
S3	8.50E+00	16.99744073	25.49616109	3.40E+01	42.49360182	50.99232218	59.49104254	67.98976291	76.48848327	84.98720363	
S5	1.62E-01	0.608517373	2.292506639	17.73065837	132.8481701	8.06E+00	2.98E+00	1.65E+00	1.09E+00	7.98E-01	
S6	1.33E+01	1.33E+01	1.33E+01	1.33E+01	1.33E+01	1.33E+01	1.33E+01	1.33E+01	1.33E+01	1.33E+01	
S7	5.10E-01	9.55E-01	2.40E+00	1.39E+01	8.34E+01	4.22E+00	1.337951133	0.648215513	0.381238394	0.250726289	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.0259182	0.0404382	0.0549582	0.0694782	0.0839982	0.0985182	0.1130382	0.1275582	0.1420782	0.1565982	
I5	0.0022	0.0044	0.0066	0.0088	0.011	0.0132	0.0154	0.0176	0.0198	0.022	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL	1100pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.228978422	0.614489211	0.409659474	0.307244605	0.245795684	0.204829737	0.175568346	0.153622303	0.136553158	0.122897842
S3	9.348592399	18.6971848	28.0457772	37.3943696	46.742962	56.0915544	65.4401468	74.7887392	84.13733159	93.48592399
S5	0.178577375	0.669369111	2.521757303	19.50372421	146.1329871	8.862292566	3.280962968	1.816654941	1.201993664	0.878340502
S6	14.67729007	14.67729007	14.67729007	14.67729007	14.67729007	14.67729007	14.67729007	14.67729007	14.67729007	14.67729007
S7	0.560732957	1.050909504	2.63943931	15.3104235	91.77151591	4.63793311	1.471746246	0.713037064	0.419362234	0.275798918
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.02851002	0.04448202	0.06045402	0.07642602	0.09239802	0.10837002	0.12434202	0.14031402	0.15628602	0.17225802
I5	0.00242	0.00484	0.00726	0.00968	0.0121	0.01452	0.01694	0.01936	0.02178	0.0242
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL	1200pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.34E+00	6.70E-01	4.47E-01	3.35E-01	2.68E-01	2.23E-01	1.92E-01	1.68E-01	1.49E-01	1.34E-01
S3	1.02E+01	20.39692887	30.59539331	4.08E+01	50.99232218	61.19078661	71.38925105	81.58771549	91.78617992	101.9846444
S5	1.95E-01	0.730220848	2.751007967	21.27679004	159.4178041	9.67E+00	3.58E+00	1.98E+00	1.31E+00	9.58E-01
S6	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01
S7	6.12E-01	1.15E+00	2.88E+00	1.67E+01	1.00E+02	5.06E+00	1.605541359	0.777858616	0.457486073	0.300871546
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.03110184	0.04852584	0.06594984	0.08337384	0.10079784	0.11822184	0.13564584	0.15306984	0.17049384	0.18791784
I5	0.00264	0.00528	0.00792	0.01056	0.0132	0.01584	0.01848	0.02112	0.02376	0.0264
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL	1300pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.452429044	0.726214522	0.484143015	0.363107261	0.290485809	0.242071507	0.207489863	0.18155363	0.161381005	0.145242904
S3	11.04833647	22.09667294	33.14500942	44.19334589	55.24168236	66.29001883	77.3383553	88.38669178	99.43502825	110.4833647
S5	0.211045988	0.791072585	2.980258631	23.04985588	172.7026211	10.47361849	3.87750169	2.146955839	1.420537966	1.038038775
S6	17.34588826	17.34588826	17.34588826	17.34588826	17.34588826	17.34588826	17.34588826	17.34588826	17.34588826	17.34588826
S7	0.662684403	1.241983959	3.119337367	18.09413687	108.4572461	5.481193675	1.739336472	0.842680167	0.495609913	0.325944175
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.03369366	0.05256966	0.07144566	0.09032166	0.10919766	0.12807366	0.14694966	0.16582566	0.18470166	0.20357766
I5	0.00286	0.00572	0.00858	0.01144	0.0143	0.01716	0.02002	0.02288	0.02574	0.0286
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL	1400pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.564154355	0.782077177	0.521384785	0.391038589	0.312830871	0.260692392	0.223450622	0.195519294	0.173794928	0.156415435
S3	11.89820851	23.79641702	35.69462553	47.59283403	59.49104254	71.38925105	83.28745956	95.18566807	107.0838766	118.9820851
S5	0.227280295	0.851924323	3.209509295	24.82292172	185.9874381	11.27928145	4.175771051	2.312106288	1.529810118	1.117887911
S6	18.68018736	18.68018736	18.68018736	18.68018736	18.68018736	18.68018736	18.68018736	18.68018736	18.68018736	18.68018736
S7	0.713660127	1.337521187	3.359286395	19.48599355	116.8001112	5.902823958	1.873131586	0.907501718	0.533733752	0.351016804
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.03628548	0.05661348	0.07694148	0.09726948	0.11759748	0.13792548	0.15825348	0.17858148	0.19890948	0.21923748
I5	0.00308	0.00616	0.00924	0.01232	0.0154	0.01848	0.02156	0.02464	0.02772	0.0308
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL	1500pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.68E+00	8.38E-01	5.59E-01	4.19E-01	3.35E-01	2.79E-01	2.39E-01	2.09E-01	1.86E-01	1.68E-01
S3	1.27E+01	25.49616109	38.24424163	5.10E+01	63.74040272	76.48848327	89.23656381	101.9846444	114.7327249	127.4808054
S5	2.44E-01	0.91277606	3.438759959	26.59598756	199.2722552	1.21E+01	4.47E+00	2.48E+00	1.64E+00	1.20E+00
S6	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01
S7	7.65E-01	1.43E+00	3.60E+00	2.09E+01	1.25E+02	6.32E+00	2.006926699	0.97232327	0.571857592	0.376089433
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.0388773	0.0606573	0.0824373	0.1042173	0.1259973	0.1477773	0.1695573	0.1913373	0.2131173	0.2348973
I5	0.0033	0.0066	0.0099	0.0132	0.0165	0.0198	0.0231	0.0264	0.0297	0.033
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL	1600pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.787604977	0.893802488	0.595868326	0.446901244	0.357520995	0.297934163	0.25537214	0.223450622	0.198622775	0.178760498
S3	13.59795258	27.19590516	40.79385774	54.39181032	67.98976291	81.58771549	95.18566807	108.7836206	122.3815732	135.9795258
S5	0.259748909	0.973627797	3.668010623	28.36905339	212.5570722	12.89060737	4.772309772	2.642407187	1.74835442	1.277586184
S6	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555
S7	0.815611573	1.528595642	3.839184452	22.26970691	133.4858413	6.746084523	2.140721812	1.037144821	0.609981431	0.401162062
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.04146912	0.06470112	0.08793312	0.11116512	0.13439712	0.15762912	0.18086112	0.20409312	0.22732512	0.25055712
I5	0.00352	0.00704	0.01056	0.01408	0.0176	0.02112	0.02464	0.02816	0.03168	0.0352
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL 1700pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)											
S1	1.899330288	0.949665144	0.633110096	0.474832572	0.379866058	0.316555048	0.271332898	0.237416286	0.211036699	0.189933029	
S3	14.44782462	28.89564923	43.34347385	57.79129847	72.23912309	86.6869477	101.1347723	115.5825969	130.0304216	144.4782462	
S5	0.275983215	1.034479535	3.897261286	30.14211923	225.8418892	13.69627033	5.070579133	2.807557636	1.857626571	1.357435321	
S6	22.68308465	22.68308465	22.68308465	22.68308465	22.68308465	22.68308465	22.68308465	22.68308465	22.68308465	22.68308465	
S7	0.866587297	1.62413287	4.07913348	23.6615636	141.8287064	7.167714806	2.274516925	1.101966372	0.64810527	0.426234691	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.04406094	0.06874494	0.09342894	0.11811294	0.14279694	0.16748094	0.19216494	0.21684894	0.24153294	0.26621694	
I5	0.00374	0.00748	0.01122	0.01496	0.0187	0.02244	0.02618	0.02992	0.03366	0.0374	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL 1800pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)											
S1	2.011055599	1.0055278	0.670351866	0.5027639	0.40221112	0.335175933	0.287293657	0.25138195	0.223450622	0.20110556	
S3	15.29769665	30.59539331	45.89308996	61.19078661	76.48848327	91.78617992	107.0838766	122.3815732	137.6792699	152.9769665	
S5	0.292217522	1.095331272	4.12651195	31.91518507	239.1267062	14.50193329	5.368848494	2.972708085	1.966898723	1.437284457	
S6	24.01738375	24.01738375	24.01738375	24.01738375	24.01738375	24.01738375	24.01738375	24.01738375	24.01738375	24.01738375	
S7	0.91756302	1.719670097	4.319082508	25.05342028	150.1715715	7.589345089	2.408312039	1.166787923	0.68622911	0.45130732	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.04665276	0.07278876	0.09892476	0.12506076	0.15119676	0.17733276	0.20346876	0.22960476	0.25574076	0.28187676	
I5	0.00396	0.00792	0.01188	0.01584	0.0198	0.02376	0.02772	0.03168	0.03564	0.0396	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL 1900pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)											
S1	2.12278091	1.061390455	0.707593637	0.530695228	0.424556182	0.353796818	0.303254416	0.265347614	0.235864546	0.212278091	
S3	16.14756869	32.29513738	48.44270607	64.59027476	80.73784345	96.88541214	113.0329808	129.1805495	145.3281182	161.4756869	
S5	0.308451829	1.15618301	4.355762614	33.6882509	252.4115232	15.30759625	5.667117855	3.137858534	2.076170874	1.517133594	
S6	25.35168284	25.35168284	25.35168284	25.35168284	25.35168284	25.35168284	25.35168284	25.35168284	25.35168284	25.35168284	
S7	0.968538743	1.815207325	4.559031536	26.44527696	158.5144366	8.010975371	2.542107152	1.231609475	0.724352949	0.476379948	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.04924458	0.07683258	0.10442058	0.13200858	0.15959658	0.18718458	0.21477258	0.24236058	0.26994858	0.29753658	
I5	0.00418	0.00836	0.01254	0.01672	0.0209	0.02508	0.02926	0.03344	0.03762	0.0418	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL 2000pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.234506221	1.117253111	0.744835407	0.558626555	0.446901244	0.372417704	0.319215174	0.279313278	0.248278469	0.223450622	
S3	16.99744073	33.99488145	50.99232218	67.98976291	84.98720363	101.9846444	118.9820851	135.9795258	152.9769665	169.9744073	
S5	0.324686136	1.217034747	4.585013278	35.46131674	265.6963402	16.11325921	5.965387215	3.303008983	2.185443025	1.59698273	
S6	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	
S7	1.019514467	1.910744553	4.798980565	27.83713364	166.8573016	8.432605654	2.675902265	1.296431026	0.762476789	0.501452577	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.0518364	0.0808764	0.1099164	0.1389564	0.1679964	0.1970364	0.2260764	0.2551164	0.2841564	0.3131964	
I5	0.0044	0.0088	0.0132	0.0176	0.022	0.0264	0.0308	0.0352	0.0396	0.044	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL 2100pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.346231532	1.173115766	0.782077177	0.586557883	0.469246306	0.391038589	0.335175933	0.293278942	0.260692392	0.234623153	
S3	17.84731276	35.69462553	53.54193829	71.38925105	89.23656381	107.0838766	124.9311893	142.7785021	160.6258149	178.4731276	
S5	0.340920443	1.277886484	4.814263942	37.23438258	278.9811572	16.91892217	6.263656576	3.468159433	2.294715176	1.676831867	
S6	28.02028104	28.02028104	28.02028104	28.02028104	28.02028104	28.02028104	28.02028104	28.02028104	28.02028104	28.02028104	
S7	1.07049019	2.00628178	5.038929593	29.22899032	175.2001667	8.854235937	2.809697378	1.361252577	0.800600628	0.526525206	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.05442822	0.08492022	0.11541222	0.14590422	0.17639622	0.20688822	0.23738022	0.26787222	0.29836422	0.32885622	
I5	0.00462	0.00924	0.01386	0.01848	0.0231	0.02772	0.03234	0.03696	0.04158	0.0462	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL 2200pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.457956843	1.228978422	0.819318948	0.614489211	0.491591369	0.409659474	0.351136692	0.307244605	0.273106316	0.245795684	
S3	18.6971848	37.3943696	56.0915544	74.7887392	93.48592399	112.1831088	130.8802936	149.5774784	168.2746632	186.971848	
S5	0.357154749	1.338738222	5.043514606	39.00744841	292.2659742	17.72458513	6.561925937	3.633309882	2.403987328	1.756681003	
S6	29.35458013	29.35458013	29.35458013	29.35458013	29.35458013	29.35458013	29.35458013	29.35458013	29.35458013	29.35458013	
S7	1.121465913	2.101819008	5.278878621	30.62084701	183.5430318	9.275866219	2.943492492	1.426074129	0.838724468	0.551597835	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.05702004	0.08896404	0.12090804	0.15285204	0.18479604	0.21674004	0.24868404	0.28062804	0.31257204	0.34451604	
I5	0.00484	0.00968	0.01452	0.01936	0.0242	0.02904	0.03388	0.03872	0.04356	0.0484	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL	2300pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.569682154	1.284841077	0.856560718	0.642420539	0.513936431	0.428280359	0.367097451	0.321210269	0.285520239	0.256968215
S3	19.54705684	39.09411367	58.64117051	78.18822734	97.73528418	117.282341	136.8293978	156.3764547	175.9235115	195.4705684
S5	0.373389056	1.399589959	5.27276527	40.78051425	305.5507912	18.53024809	6.860195298	3.798460331	2.513259479	1.83653014
S6	30.68887923	30.68887923	30.68887923	30.68887923	30.68887923	30.68887923	30.68887923	30.68887923	30.68887923	30.68887923
S7	1.172441637	2.197356235	5.518827649	32.01270369	191.8858969	9.697496502	3.077287605	1.49089568	0.876848307	0.576670464
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.05961186	0.09300786	0.12640386	0.15979986	0.19319586	0.22659186	0.25998786	0.29338386	0.32677986	0.36017586
I5	0.00506	0.01012	0.01518	0.02024	0.0253	0.03036	0.03542	0.04048	0.04554	0.0506
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL	2400pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.681407465	1.340703733	0.893802488	0.670351866	0.536281493	0.446901244	0.383058209	0.335175933	0.297934163	0.268140747
S3	20.39692887	40.79385774	61.19078661	81.58771549	101.9846444	122.3815732	142.7785021	163.175431	183.5723598	203.9692887
S5	0.389623363	1.460441696	5.502015934	42.55358009	318.8356082	19.33591105	7.158464658	3.96361078	2.62253163	1.916379276
S6	32.02317833	32.02317833	32.02317833	32.02317833	32.02317833	32.02317833	32.02317833	32.02317833	32.02317833	32.02317833
S7	1.22341736	2.292893463	5.758776677	33.40456037	200.228762	10.11912678	3.211082718	1.555717231	0.914972147	0.601743093
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.06220368	0.09705168	0.13189968	0.16674768	0.20159568	0.23644368	0.27129168	0.30613968	0.34098768	0.37583568
I5	0.00528	0.01056	0.01584	0.02112	0.0264	0.03168	0.03696	0.04224	0.04752	0.0528
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL	2500pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.793132776	1.396566388	0.931044259	0.698283194	0.558626555	0.465522129	0.399018968	0.349141597	0.310348086	0.279313278
S3	21.24680091	42.49360182	63.74040272	84.98720363	106.2340045	127.4808054	148.7276064	169.9744073	191.2212082	212.4680091
S5	0.40585767	1.521293434	5.731266598	44.32664593	332.1204253	20.14157401	7.456734019	4.128761229	2.731803782	1.996228413
S6	33.35747743	33.35747743	33.35747743	33.35747743	33.35747743	33.35747743	33.35747743	33.35747743	33.35747743	33.35747743
S7	1.274393083	2.388430691	5.998725706	34.79641705	208.5716271	10.54075707	3.344877831	1.620538783	0.953095986	0.626815722
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.0647955	0.1010955	0.1373955	0.1736955	0.2099955	0.2462955	0.2825955	0.3188955	0.3551955	0.3914955
I5	0.0055	0.011	0.0165	0.022	0.0275	0.033	0.0385	0.044	0.0495	0.055
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL 2600pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.904858087	1.452429044	0.968286029	0.726214522	0.580971617	0.484143015	0.414979727	0.363107261	0.32276201	0.290485809	
S3	22.09667294	44.19334589	66.29001883	88.38669178	110.4833647	132.5800377	154.6767106	176.7733836	198.8700565	220.9667294	
S5	0.422091977	1.582145171	5.960517262	46.09971176	345.4052423	20.94723697	7.75500338	4.293911679	2.841075933	2.076077549	
S6	34.69177652	34.69177652	34.69177652	34.69177652	34.69177652	34.69177652	34.69177652	34.69177652	34.69177652	34.69177652	
S7	1.325368806	2.483967918	6.238674734	36.18827373	216.9144921	10.96238735	3.478672945	1.685360334	0.991219825	0.651888351	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.06738732	0.10513932	0.14289132	0.18064332	0.21839532	0.25614732	0.29389932	0.33165132	0.36940332	0.40715532	
I5	0.00572	0.01144	0.01716	0.02288	0.0286	0.03432	0.04004	0.04576	0.05148	0.0572	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL 2700pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	3.016583399	1.508291699	1.0055278	0.75414585	0.60331668	0.5027639	0.430940486	0.377072925	0.335175933	0.30165834	
S3	22.94654498	45.89308996	68.83963494	91.78617992	114.7327249	137.6792699	160.6258149	183.5723598	206.5189048	229.4654498	
S5	0.438326283	1.642996908	6.189767926	47.8727776	358.6900593	21.75289994	8.053272741	4.459062128	2.950348084	2.155926686	
S6	36.02607562	36.02607562	36.02607562	36.02607562	36.02607562	36.02607562	36.02607562	36.02607562	36.02607562	36.02607562	
S7	1.37634453	2.579505146	6.478623762	37.58013042	225.2573572	11.38401763	3.612468058	1.750181885	1.029343665	0.676960979	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.06997914	0.10918314	0.14838714	0.18759114	0.22679514	0.26599914	0.30520314	0.34440714	0.38361114	0.42281514	
I5	0.00594	0.01188	0.01782	0.02376	0.0297	0.03564	0.04158	0.04752	0.05346	0.0594	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL 2800pF		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	3.12830871	1.564154355	1.04276957	0.782077177	0.625661742	0.521384785	0.446901244	0.391038589	0.347589857	0.312830871	
S3	23.79641702	47.59283403	71.38925105	95.18566807	118.9820851	142.7785021	166.5749191	190.3713361	214.1677532	237.9641702	
S5	0.45456059	1.703848646	6.419018589	49.64584344	371.9748763	22.5585629	8.351542101	4.624212577	3.059620235	2.235775822	
S6	37.36037472	37.36037472	37.36037472	37.36037472	37.36037472	37.36037472	37.36037472	37.36037472	37.36037472	37.36037472	
S7	1.427320253	2.675042374	6.71857279	38.9719871	233.6002223	11.80564792	3.746263171	1.815003436	1.067467504	0.702033608	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.07257096	0.11322696	0.15388296	0.19453896	0.23519496	0.27585096	0.31650696	0.35716296	0.39781896	0.43847496	
I5	0.00616	0.01232	0.01848	0.02464	0.0308	0.03696	0.04312	0.04928	0.05544	0.0616	
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376	

CL	2900pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	3.240034021	1.62001701	1.08001134	0.810008505	0.648006804	0.54000567	0.462862003	0.405004253	0.36000378	0.324003402
S3	24.64628905	49.29257811	73.93886716	98.58515621	123.2314453	147.8777343	172.5240234	197.1703124	221.8166015	246.4628905
S5	0.470794897	1.764700383	6.648269253	51.41890927	385.2596933	23.36422586	8.649811462	4.789363026	3.168892387	2.315624959
S6	38.69467381	38.69467381	38.69467381	38.69467381	38.69467381	38.69467381	38.69467381	38.69467381	38.69467381	38.69467381
S7	1.478295976	2.770579601	6.958521819	40.36384378	241.9430874	12.2272782	3.880058284	1.879824988	1.105591344	0.727106237
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.07516278	0.11727078	0.15937878	0.20148678	0.24359478	0.28570278	0.32781078	0.36991878	0.41202678	0.45413478
I5	0.00638	0.01276	0.01914	0.02552	0.0319	0.03828	0.04466	0.05104	0.05742	0.0638
Vds5	1.181528662	0.863057325	0.544585987	0.22611465	-0.092356688	-0.410828025	-0.729299363	-1.047770701	-1.366242038	-1.684713376

CL 800pf		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	0.893802488	0.446901244	0.297934163	0.223450622	0.178760498	0.148967081	0.12768607	0.111725311	0.099311388	0.089380249	
S3	6.8	13.6	20.4	27.2	34	40.8	47.6	54.4	61.2	68	
S5	0.188194222	0.824783759	4.58076791	1063.417595	10.60611171	2.915584279	1.469599583	0.931606862	0.665176681	0.51041289	
S6	8.539514221	8.539514221	8.539514221	8.539514221	8.539514221	8.539514221	8.539514221	8.539514221	8.539514221	8.539514221	
S7	0.590929858	1.294910501	4.794537079	834.7828119	6.660638154	1.525822439	0.659220384	0.365655693	0.232072753	0.160269647	
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.028651136	0.046251136	0.063851136	0.081451136	0.099051136	0.116651136	0.134251136	0.151851136	0.169451136	0.187051136	
I5	0.00176	0.00352	0.00528	0.00704	0.0088	0.01056	0.01232	0.01408	0.01584	0.0176	
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376	

CL 900pf		20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)	1.00E+01	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.01E+00	5.03E-01	3.35E-01	2.51E-01	2.01E-01	1.68E-01	1.44E-01	1.26E-01	1.12E-01	1.01E-01
S3	7.65E+00	15.3	23	3.06E+01	38.22	45.9	53.54	61.2	68.84	76.48
S5	2.12E-01	0.927881729	5.153363899	1196.344794	11.93187567	3.28E+00	1.65E+00	1.05E+00	7.48E-01	5.74E-01
S6	9.61E+00	9.61E+00	9.61E+00	9.61E+00	9.61E+00	9.61E+00	9.61E+00	9.61E+00	9.61E+00	9.61E+00
S7	6.65E-01	1.46E+00	5.39E+00	9.39E+02	7.49E+00	1.72E+00	0.741622932	0.411362655	0.261081847	0.180303353
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.032232528	0.052032528	0.071805501	0.091632528	0.111442287	0.131232528	0.15103485	0.170832528	0.190634334	0.210435779
I5	0.00198	0.00396	0.00594	0.00792	0.0099	0.01188	0.01386	0.01584	0.01782	0.0198
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL 1000pf		20	30	40	50	60	70	80	90	100
SR(V/uS)	1.00E+01	2.00E+01	3.00E+01	4.00E+01	5.00E+01	6.00E+01	70	80	90	100
S1	1.12E+00	0.558626555	0.372417704	2.79E-01	0.223450622	0.186208852	0.159607587	0.139656639	0.124139235	0.111725311
S3	8.50E+00	17	25.5	34	42.5	51	59.5	68	76.48	85
S5	2.35E-01	1.03E+00	5.73E+00	1.33E+03	1.33E+01	3.64E+00	1.836999479	1.164508578	0.831470851	0.638016112
S6	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01
S7	0.738662323	1.618638127	5.993171349	1043.478515	8.325797692	1.907278049	0.82402548	0.457069617	0.290090941	0.200337059
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.03581392	0.05781392	0.07981392	0.10181392	0.12381392	0.14581392	0.16781392	0.18981392	0.211817532	0.23381392
I5	0.0022	0.0044	0.0066	0.0088	0.011	0.0132	0.0154	0.0176	0.0198	0.022
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	1100pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.228978422	0.614489211	0.409659474	0.307244605	0.245795684	0.204829737	0.175568346	0.153622303	0.136553158	0.122897842
S3	9.35	18.7	28.04	37.4	46.74	56.1	65.44	74.78	84.13	93.48
S5	0.258767056	1.134077668	6.298555876	1462.199193	14.5834036	4.008928384	2.020699426	1.280959435	0.914617936	0.701817724
S6	11.74183205	11.74183205	11.74183205	11.74183205	11.74183205	11.74183205	11.74183205	11.74183205	11.74183205	11.74183205
S7	0.812528555	1.780501939	6.592488484	1147.826366	9.158377461	2.098005854	0.906428028	0.502776578	0.319100036	0.220370765
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.039395312	0.063595312	0.087800731	0.111995312	0.136198563	0.160395312	0.184597634	0.208799376	0.232998924	0.257198563
I5	0.00242	0.00484	0.00726	0.00968	0.0121	0.01452	0.01694	0.01936	0.02178	0.0242
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	1200pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.340703733	0.670351866	0.446901244	0.335175933	0.268140747	0.223450622	0.191529105	0.167587967	0.148967081	0.134070373
S3	10.2	20.4	30.6	40.8	51	61.2	71.38	81.58	91.78	102
S5	0.282291334	1.237175638	6.871151865	1595.126392	15.90916756	4.373376419	2.204399374	1.397410293	0.997765021	0.765619335
S6	12.80927133	12.80927133	12.80927133	12.80927133	12.80927133	12.80927133	12.80927133	12.80927133	12.80927133	12.80927133
S7	0.886394787	1.942365752	7.191805619	1252.174218	9.990957231	2.288733659	0.988830576	0.54848354	0.34810913	0.240404471
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.042976704	0.069376704	0.095776704	0.122176704	0.148576704	0.174976704	0.201381349	0.227780768	0.254180316	0.280576704
I5	0.00264	0.00528	0.00792	0.01056	0.0132	0.01584	0.01848	0.02112	0.02376	0.0264
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	1300pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.452429044	0.726214522	0.484143015	0.363107261	0.290485809	0.242071507	0.207489863	0.181553363	0.161381005	0.145242904
S3	11	22.1	33.14	44.19	55.24	66.3	77.33	88.38	99.43	110.48
S5	0.305815611	1.340273608	7.443747854	1728.053592	17.23493153	4.737824453	2.388099322	1.513861151	1.080912106	0.829420946
S6	13.87671061	13.87671061	13.87671061	13.87671061	13.87671061	13.87671061	13.87671061	13.87671061	13.87671061	13.87671061
S7	0.96026102	2.104229564	7.791122754	1356.522069	10.823537	2.479461464	1.071233124	0.594190502	0.377118224	0.260438177
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.046639724	0.075158096	0.103763515	0.13236216	0.160961347	0.189558096	0.218162741	0.24676216	0.275361708	0.303961347
I5	0.00286	0.00572	0.00858	0.01144	0.0143	0.01716	0.02002	0.02288	0.02574	0.0286
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	1400pf									
SR(V/uS)	1.00E+01	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.56E+00	7.82E-01	5.21E-01	3.91E-01	3.13E-01	2.61E-01	2.23E-01	1.96E-01	1.74E-01	1.56E-01
S3	1.19E+01	23.8	35.7	4.76E+01	59.5	71.4	83.28	95.18	107.08	119
S5	3.29E-01	1.443371578	8.016343843	1860.980791	18.56069549	5.10E+00	2.57E+00	1.63E+00	1.16E+00	8.93E-01
S6	1.49E+01	1.49E+01	1.49E+01	1.49E+01	1.49E+01	1.49E+01	1.49E+01	1.49E+01	1.49E+01	1.49E+01
S7	1.03E+00	2.27E+00	8.39E+00	1.46E+03	1.17E+01	2.67E+00	1.153635673	0.639897463	0.406127318	0.280471883
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.050139488	0.080939488	0.1111739488	0.142539488	0.173339488	0.204139488	0.234944133	0.265743552	0.2965431	0.327339488
I5	0.00308	0.00616	0.00924	0.01232	0.0154	0.01848	0.02156	0.02464	0.02772	0.0308
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	1500pf									
SR(V/uS)	1.00E+01	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.68E+00	8.38E-01	5.59E-01	4.19E-01	3.35E-01	2.79E-01	2.39E-01	2.09E-01	1.86E-01	1.68E-01
S3	1.27E+01	25.5	38.24	5.10E+01	63.74	76.5	89.23	102	114.73	127.48
S5	3.53E-01	1.546469548	8.588939831	1993.90799	19.88645946	5.47E+00	2.76E+00	1.75E+00	1.25E+00	9.57E-01
S6	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01	1.60E+01
S7	1.11E+00	2.43E+00	8.99E+00	1.57E+03	1.25E+01	2.86E+00	1.236038221	0.685604425	0.435136412	0.300505589
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.053802458	0.08672088	0.119726299	0.15272088	0.185724131	0.21872088	0.251725524	0.28472088	0.317724492	0.350724131
I5	0.0033	0.0066	0.0099	0.0132	0.0165	0.0198	0.0231	0.0264	0.0297	0.033
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	1600 pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.787604977	0.893802488	0.595868326	0.446901244	0.357520995	0.297934163	0.25537214	0.223450622	0.198622775	0.178760498
S3	13.6	27.2	40.8	54.4	68	81.6	95.18	108.78	122.38	136
S5	0.376388445	1.649567517	9.16153582	2126.83519	21.21222342	5.831168558	2.939199166	1.863213724	1.330353362	1.02082578
S6	17.07902844	17.07902844	17.07902844	17.07902844	17.07902844	17.07902844	17.07902844	17.07902844	17.07902844	17.07902844
S7	1.181859717	2.589821002	9.589074158	1669.565624	13.32127631	3.051644879	1.318440769	0.731311387	0.464145506	0.320539295
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.057302272	0.092502272	0.127702272	0.162902272	0.198102272	0.233302272	0.268506916	0.303706336	0.338905884	0.374102272
I5	0.00352	0.00704	0.01056	0.01408	0.0176	0.02112	0.02464	0.02816	0.03168	0.0352
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	1700 pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	1.899330288	0.949665144	0.633110096	0.474832572	0.379866058	0.316555048	0.271332898	0.237416286	0.211036699	0.189933029
S3	14.4	28.9	43.34	57.8	72.23	86.7	101.13	155.58	130.03	144.47
S5	0.399912723	1.752665487	9.734131809	2259.762389	22.53798738	6.195616593	3.122899114	1.979664582	1.413500447	1.084627391
S6	18.14646772	18.14646772	18.14646772	18.14646772	18.14646772	18.14646772	18.14646772	18.14646772	18.14646772	18.14646772
S7	1.255725949	2.751684815	10.18839129	1773.913475	14.15385608	3.242372684	1.400843317	0.777018348	0.4931546	0.340573001
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.060965205	0.098283664	0.135689083	0.173083664	0.210490167	0.247883664	0.285288308	0.316648975	0.360087276	0.397488541
I5	0.00374	0.00748	0.01122	0.01496	0.0187	0.02244	0.02618	0.02992	0.03366	0.0374
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	1800 pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.011055599	1.0055278	0.670351866	0.5027639	0.40221112	0.335175933	0.287293657	0.25138195	0.223450622	0.20110556
S3	15.3	30.6	45.9	61.2	76.48	91.8	107.08	122.38	137.67	152.97
S5	0.423437	1.855763457	10.3067278	2392.689588	23.86375135	6.560064628	3.306599061	2.09611544	1.496647532	1.148429002
S6	19.213907	19.213907	19.213907	19.213907	19.213907	19.213907	19.213907	19.213907	19.213907	19.213907
S7	1.329592181	2.913548628	10.78770843	1878.261327	14.98643585	3.433100489	1.483245865	0.82272531	0.522163695	0.360606707
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.064465056	0.104065056	0.143665056	0.183265056	0.222871558	0.262465056	0.3020697	0.34166912	0.381270475	0.420869933
I5	0.00396	0.00792	0.01188	0.01584	0.0198	0.02376	0.02772	0.03168	0.03564	0.0396
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	1900 pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.12278091	1.061390455	0.707593637	0.530695228	0.424556182	0.353796818	0.303254416	0.265347614	0.235864546	0.212278091
S3	16.1	32.3	48.44	64.6	80.73	97	113.03	129.18	145.32	161.47
S5	0.446961278	1.958861427	10.87932379	2525.616788	25.18951531	6.924512663	3.490299009	2.212566297	1.579794617	1.212230614
S6	20.28134627	20.28134627	20.28134627	20.28134627	20.28134627	20.28134627	20.28134627	20.28134627	20.28134627	20.28134627
S7	1.403458413	3.07541244	11.38702556	1982.609178	15.81901562	3.623828294	1.565648413	0.868432272	0.551172789	0.380640413
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.068127959	0.109846448	0.151651866	0.193446448	0.23525295	0.27701939	0.318851092	0.360650512	0.402451866	0.444251325
I5	0.00418	0.00836	0.01254	0.01672	0.0209	0.02508	0.02926	0.03344	0.03762	0.0418
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2000pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.234506221	1.117253111	0.744835407	0.558626555	0.446901244	0.372417704	0.319215174	0.279313278	0.248278469	0.223450622
S3	17	34	51	68	85	102	119	136	153	170
S5	0.470485556	2.061959397	11.45191978	2658.543987	26.51527927	7.288960698	3.673998957	2.329017155	1.662941702	1.276032225
S6	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555	21.34878555
S7	1.477324646	3.237276253	11.9863427	2086.95703	16.65159538	3.814556098	1.648050961	0.914139233	0.580181883	0.400674119
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.07162784	0.11562784	0.15962784	0.20362784	0.24762784	0.29162784	0.33562784	0.37962784	0.42362784	0.46762784
I5	0.0044	0.0088	0.0132	0.0176	0.022	0.0264	0.0308	0.0352	0.0396	0.044
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2100 pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.346231532	1.173115766	0.782077177	0.586557883	0.469246306	0.391038589	0.335175933	0.293278942	0.260692392	0.234623153
S3	17.8	35.7	53.54	71.38	89.23	107	125	142.77	160.62	178.47
S5	0.494009834	2.165057367	12.02451576	2791.471186	27.84104324	7.653408733	3.857698905	2.445468013	1.746088787	1.339833836
S6	22.41622483	22.41622483	22.41622483	22.41622483	22.41622483	22.41622483	22.41622483	22.41622483	22.41622483	22.41622483
S7	1.551190878	3.399140066	12.58565983	2191.304881	17.48417515	4.005283903	1.730453509	0.959846195	0.609190977	0.420707825
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.075290719	0.121409232	0.16761465	0.21381736	0.260015734	0.306236344	0.352397628	0.398615328	0.44481465	0.491014108
I5	0.00462	0.00924	0.01386	0.01848	0.0231	0.02772	0.03234	0.03696	0.04158	0.0462
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2200 pF									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.457956843	1.228978422	0.819318948	0.614489211	0.491591369	0.409659474	0.351136692	0.307244605	0.273106316	0.245795684
S3	18.7	37.4	56.1	74.78	93.48	112	130.88	149.57	168.27	187
S5	0.517534112	2.268155337	12.59711175	2924.398386	29.1668072	8.017856767	4.041398853	2.561918871	1.829235872	1.403635447
S6	23.48366411	23.48366411	23.48366411	23.48366411	23.48366411	23.48366411	23.48366411	23.48366411	23.48366411	23.48366411
S7	1.62505711	3.561003878	13.18497697	2295.652733	18.31675492	4.196011708	1.812856057	1.005553157	0.638200071	0.44074153
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.078790624	0.127190624	0.175590624	0.223998752	0.272397126	0.320844893	0.369195268	0.41759672	0.465996042	0.514390624
I5	0.00484	0.00968	0.01452	0.01936	0.0242	0.02904	0.03388	0.03872	0.04356	0.0484
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2300pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.569682154	1.284841077	0.856560718	0.642420539	0.513936431	0.428280359	0.367097451	0.321210269	0.285520239	0.256968215
S3	19.5	39.09	58.64	78.18	97.73	117	136.82	156.37	175.92	195.47
S5	0.541058389	2.371253306	13.16970774	3057.325585	30.49257117	8.382304802	4.225098801	2.678369728	1.912382958	1.467437058
S6	24.55110339	24.55110339	24.55110339	24.55110339	24.55110339	24.55110339	24.55110339	24.55110339	24.55110339	24.55110339
S7	1.698923343	3.722867691	13.7842941	2400.000584	19.14933469	4.386739513	1.895258605	1.051260118	0.667209165	0.460775236
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.082453483	0.132980144	0.183577434	0.234180144	0.284778518	0.335453483	0.385978983	0.436578112	0.487177434	0.537776892
I5	0.00506	0.01012	0.01518	0.02024	0.0253	0.03036	0.03542	0.04048	0.04554	0.0506
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2400pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.681407465	1.340703733	0.893802488	0.670351866	0.536281493	0.446901244	0.383058209	0.335175933	0.297934163	0.268140747
S3	20.4	40.8	61.2	81.58	102	122	142.77	163.175	183.57	204
S5	0.564582667	2.474351276	13.74230373	3190.252784	31.81833513	8.746752837	4.408798748	2.794820586	1.995530043	1.53123867
S6	25.61854266	25.61854266	25.61854266	25.61854266	25.61854266	25.61854266	25.61854266	25.61854266	25.61854266	25.61854266
S7	1.772789575	3.884731504	14.38361124	2504.348436	19.98191446	4.577467318	1.977661153	1.09696708	0.696218259	0.480808942
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.085953408	0.138753408	0.191553408	0.244361536	0.297153408	0.350062108	0.402760375	0.455558488	0.508358826	0.561153408
I5	0.00528	0.01056	0.01584	0.02112	0.0264	0.03168	0.03696	0.04224	0.04752	0.0528
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2500pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.793132776	1.396566388	0.931044259	0.698283194	0.558626555	0.465522129	0.399018968	0.349141597	0.310348086	0.279313278
S3	21.2	42.5	63.74	85	106.23	127	148.72	170	191.22	212.46
S5	0.588106945	2.577449246	14.31489972	3323.179984	33.14409909	9.111200872	4.592498696	2.911271444	2.078677128	1.595040281
S6	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194	26.68598194
S7	1.846655807	4.046595316	14.98292837	2608.696287	20.81449423	4.768195123	2.060063701	1.142674042	0.725227353	0.500842648
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.08961625	0.1445348	0.199540218	0.2545348	0.309541302	0.364670764	0.419541767	0.4745348	0.529540218	0.584541302
I5	0.0055	0.011	0.0165	0.022	0.0275	0.033	0.0385	0.044	0.0495	0.055
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2600pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	2.904858087	1.452429044	0.968286029	0.726214522	0.580971617	0.484143015	0.414979727	0.363107261	0.32276201	0.290485809
S3	22.1	44.2	66.3	88.38	110.48	133	154.67	176.77	198.87	221
S5	0.611631223	2.680547216	14.88749571	3456.107183	34.46986306	9.475648907	4.776198644	3.027722302	2.161824213	1.658841892
S6	27.75342122	27.75342122	27.75342122	27.75342122	27.75342122	27.75342122	27.75342122	27.75342122	27.75342122	27.75342122
S7	1.92052204	4.208459129	15.58224551	2713.044139	21.647074	4.958922928	2.142466249	1.188381003	0.754236448	0.520876354
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.093116192	0.150316192	0.207516192	0.26472432	0.321922694	0.379008174	0.436323159	0.493522288	0.55072161	0.607916192
I5	0.00572	0.01144	0.01716	0.02288	0.0286	0.03432	0.04004	0.04576	0.05148	0.0572
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2700pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	3.016583399	1.508291699	1.0055278	0.75414585	0.60331668	0.5027639	0.430940486	0.377072925	0.335175933	0.30165834
S3	22.9	45.89	68.83	91.78	114.73	138	160.62	183.57	206.51	229.46
S5	0.635155501	2.783645186	15.4600917	3589.034383	35.79562702	9.840096942	4.959898592	3.144173159	2.244971298	1.722643503
S6	28.8208605	28.8208605	28.8208605	28.8208605	28.8208605	28.8208605	28.8208605	28.8208605	28.8208605	28.8208605
S7	1.994388272	4.370322942	16.18156264	2817.39199	22.47965377	5.149650733	2.224868797	1.234087965	0.783245542	0.54091006
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.09677902	0.156105712	0.215508422	0.274905712	0.334304086	0.393616502	0.45310455	0.51250368	0.571904809	0.631304086
I5	0.00594	0.01188	0.01782	0.02376	0.0297	0.03564	0.04158	0.04752	0.05346	0.0594
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2800pf									
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S1	3.12830871	1.564154355	1.04276957	0.782077177	0.625661742	0.521384785	0.446901244	0.391038589	0.347589857	0.312830871
S3	23.8	47.6	71.38	95.18	119	143	166.57	190.37	214.16	238
S5	0.658679778	2.886743156	16.03268769	3721.961582	37.12139098	10.20454498	5.14359854	3.260624017	2.328118383	1.786445115
S6	29.88829977	29.88829977	29.88829977	29.88829977	29.88829977	29.88829977	29.88829977	29.88829977	29.88829977	29.88829977
S7	2.068254504	4.532186754	16.78087978	2921.739842	23.31223354	5.340378538	2.307271345	1.279794927	0.812254636	0.560943766
Av	17444.44444	8722.222222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444
Pdiss	0.100278976	0.161878976	0.223489814	0.285087104	0.346678976	0.40822488	0.469885942	0.531485072	0.5930862	0.654678976
I5	0.00616	0.01232	0.01848	0.02464	0.0308	0.03696	0.04312	0.04928	0.05544	0.0616
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376

CL	2900pf										
SR(V/uS)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
S1	3.240034021	1.62001701	1.08001134	0.810008505	0.648006804	0.54000567	0.462862003	0.405004253	0.36000378	0.324003402	
S3	24.6	49.3	74	98.58	123.23	148	172.52	197.17	221.81	246.46	
S5	0.682204056	2.989841125	16.60528367	3854.888781	38.44715495	10.56899301	5.327298488	3.377074875	2.411265468	1.850246726	
S6	30.95573905	30.95573905	30.95573905	30.95573905	30.95573905	30.95573905	30.95573905	30.95573905	30.95573905	30.95573905	
S7	2.142120736	4.694050567	17.38019691	3026.087693	24.14481331	5.531106343	2.389673893	1.325501888	0.84126373	0.580977472	
Av	17444.44444	8722.22222	5814.814815	4361.111111	3488.888889	2907.407407	2492.063492	2180.555556	1938.271605	1744.444444	
Pdiss	0.103941792	0.167660368	0.2314333	0.295268496	0.35906687	0.4228333	0.486667334	0.550466463	0.614267592	0.67806687	
I5	0.00638	0.01276	0.01914	0.02552	0.0319	0.03828	0.04466	0.05104	0.05742	0.0638	
Vds5	0.981528662	0.663057325	0.344585987	0.02611465	-0.292356688	-0.610828025	-0.929299363	-1.247770701	-1.566242038	-1.884713376	