



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KEAKURATAN PROGRAM SIMULATOR SUGAR
DALAM SIMULASI PERPINDAHAN MEMS
AKSELEROMETER KAPASITIF BERDASARKAN
PEMBERIAN TEGANGAN DENGAN MENGGUNAKAN
PENDEKATAN LINEAR**

SKRIPSI

**MARTHIN SURYA SETIAWAN
0606074110**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KEAKURATAN PROGRAM SIMULATOR SUGAR
DALAM SIMULASI PERPINDAHAN MEMS
AKSELEROMETER KAPASITIF BERDASARKAN
PEMBERIAN TEGANGAN DENGAN MENGGUNAKAN
PENDEKATAN LINEAR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

**MARTHIN SURYA SETIAWAN
0606074110**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Marthin Surya Setiawan

NPM : 0606074110

Tanda Tangan :

Tanggal : 14 Juni 2010

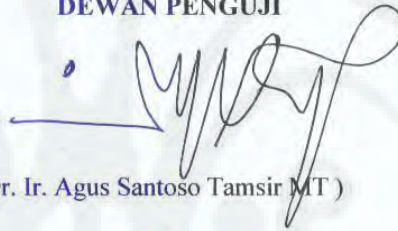
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Marthin Surya Setiawan
NPM : 0606074110
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Uji Keakuratan Program Simulator Sugar Dalam Simulasi Perpindahan Mems Akselerometer Kapasitif Berdasarkan Pemberian Tegangan Dengan Menggunakan Pendekatan Linear

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

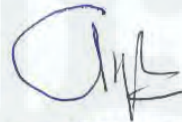
DEWAN PENGUJI

Pembimbing :



(Dr. Ir. Agus Santoso Tamsir MT)

Penguji :



(Dr. Ir. Arman D. Diponegoro)

Penguji :



(Chairul Hudaya ST, M.Sc)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan Tuhan yang Maha Esa sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak DR.Ir. Agus Santoso Tamsir MT selaku pembimbing skripsi ini, yang telah meluangkan waktunya, serta masukan-masukan selama bimbingan sehingga skripsi ini dapat berjalan dengan lancar;
2. Bapak Dr. Ir. Ridwan Gunawan MT yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan pengetahuan baru kepada penulis;
3. Taufiq Mardiansyah, Cindy Chairunissa, Teddy Febrianto, Fauzi Dwi Reza Aditya, Muhammad Firdauz Syawaludin Lubis, Abdul Aziz, Suria, Jepry, M. Apriyudi Syaputra, Maria Widayanti, keluarga, serta teman-teman lainnya yang turut membantu dan memberikan dukungan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik ;
4. Dan seluruh Sivitas Akademik Departemen Teknik Elektro yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Semoga skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juni 2010

Marthin Surya Setiawan

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

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

Nama : Marthin Surya Setiawan
NPM : 0606074110
Program studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

**UJI KEAKURATAN PROGRAM SIMULATOR SUGAR DALAM
SIMULASI PERPINDAHAN MEMS AKSELEROMETER KAPASITIF
BERDASARKAN PEMBERIAN TEGANGAN DENGAN
MENGUNAKAN PENDEKATAN LINEAR**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 14 Juni 2010

Yang menyatakan

Marthin Surya Setiawan`

ABSTRACT

Name : Marthin Surya Setiawan
Major : Electrical Engineering
Title : SUGAR simulator precision testing on simulating displacement of capacitive accelerometer MEMS based on applied voltage using linear approach

MEMS accelerometer simulators have been used since the advancement in MEMS technology has been so great lately. However, most of the simulators are licensed and will cost too much. Such things are constraining the advancement of students and researchers in MEMS world. Therefore, in this minithesis we introduce SUGAR simulator as one of the realistic solution because this program is an open-source program. This simulator program is easy to use since it is programmed in MATLAB. Moreover, MATLAB functions can also be used with SUGAR to support SUGAR simulation. Therefore, the writer suggests the topic of SUGAR simulator reliability testing to explore more of its reliability.

Key words : MEMS accelerometer, simulator, SUGAR, simulation

ABSTRAK

Nama : Marthin Surya Setiawan
Program studi : Teknik Elektro
Judul : Uji keakuratan program simulator SUGAR dalam simulasi perpindahan MEMS akselero meter kapasitif berdasarkan pemberian tegangan dengan menggunakan pendekatan linear

Program-program simulator MEMS akselero meter telah banyak muncul dikarenakan perkembangan teknologi MEMS yang cenderung pesat dewasa ini. Namun, kebanyakan dari program-program simulator tersebut berlisensi dan berharga sangat mahal. Hal-hal tersebut menjadi kendala bagi perkembangan pelajar-pelajar maupun kalangan-kalangan peneliti yang berkecimpung di dalam dunia MEMS. Oleh karena itu, dalam skripsi ini akan diperkenalkan sebuah program simulator bernama SUGAR yang akan menjadi salah satu alternatif yang realistis karena program ini bersifat *open-source*. Program simulator ini juga cukup mudah untuk digunakan karena telah terprogram dalam MATLAB. Bahkan, fungsi-fungsi MATLAB dapat digunakan untuk menunjang keakuratan dari SUGAR. Oleh karena itu, penulis mengangkat tema uji keakuratan simulator SUGAR dengan pendekatan linear untuk mengeksplor lebih lanjut keakuratan dari program simulator tersebut.

Kata kunci : MEMS akselero meter, simulator, SUGAR, simulasi

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALIAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR GRAFIK.....	xii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar belakang.....	1
1.2. Tujuan.....	2
1.3. Pembatasan masalah.....	2
1.4. Sistematika penulisan.....	2
2. DASAR TEORI	4
2.1. Akselerometer MEMS kapasitif.....	4
2.1.1. Konsep dasar.....	4
2.1.1.1. <i>Damping</i>	7
2.1.1.1.1. <i>Squeeze Film Damping</i>	7
2.1.1.2. Konstanta pegas	8
2.1.1.3. Pemodelan dari aktuator elektrostatik.....	10
2.2. Simulator SUGAR	12
2.2.1. Representasi MEMS dalam SUGAR	13
2.2.2. Residual Stress	17
2.2.3. <i>Gap</i> Elektrostatik.....	18
2.2.4. Analisis	18
3. METODOLOGI PENELITIAN	20
3.1. Rancangan penelitian.....	20
3.2. Lokasi dan waktu penelitian.....	22
3.3 <i>Input</i> simulasi.....	23
3.4 Langkah-langkah penelitian.....	23
3.5 Analisis data.....	27
4. HASIL DAN ANALISIS PENELITIAN.....	29
4.1. Analisa grafik.....	29
4.1.1. Variasi lebar <i>proofmass</i>	29
4.1.2. Variasi panjang <i>proofmass</i>	32
4.1.3. Variasi panjang tether.....	34
4.1.4. Variasi lebar <i>tether</i>	37
4.1.5. Variasi tebal <i>tether</i>	40
4.1.6. Variasi tebal desain.....	43
4.1.7 Variasi <i>gap</i> kecil.....	46
4.1.8 Variasi <i>gap</i> besar	48

4.1.9 Variasi panjang <i>finger</i>	50
4.1.10 Variasi tebal <i>finger</i>	53
5. KESIMPULAN	56
DAFTAR REFERENSI	57
LAMPIRAN	60



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Struktur akselerometer.....	5
Gambar 2.2. (a) <i>squeeze film damping</i> dan (b) <i>viscous film damping</i>	7
Gambar 2.3. Plot dari fungsi (W/L) berbanding dengan nilai rasio perbandingan sisi plat yang bergerak (W/L).....	8
Gambar 2.4. Desain pegas <i>crab-leg</i> dengan penopang lurus.....	9
Gambar 2.5. Struktur skematik dari plat kapasitor paralel.....	10
Gambar 3.1. Bentuk umum desain MEMS akselerometer kapasitif yang disimulasikan.....	21

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1. Grafik perpindahan dari variasi lebar <i>proofmass</i>	30
Grafik 4.2. Grafik persentase kesalahan dari variasi lebar <i>proofmass</i>	31
Grafik 4.3. Grafik perpindahan dari variasi lebar <i>proofmass</i>	33
Grafik 4.4. Grafik persentase kesalahan dari variasi panjang <i>proofmass</i>	34
Grafik 4.5. Grafik perpindahan dari variasi panjang <i>tether</i> berukuran 50 μm , 100 μm dan 150 μm	35
Grafik 4.6. Grafik perpindahan dari variasi panjang <i>tether</i> berukuran 200 μm dan 250 μm	36
Grafik 4.7. Grafik persentase kesalahan dari variasi panjang <i>tether</i>	37
Grafik 4.8. Grafik perpindahan dari variasi lebar <i>tether</i> berukuran 2 μm dan 3 μm	38
Grafik 4.9. Grafik perpindahan dari variasi lebar <i>tether</i> berukuran 4 μm , 5 μm dan 6 μm	39
Grafik 4.10. Grafik persentase kesalahan dari variasi lebar <i>tether</i>	40
Grafik 4.11. Grafik perpindahan dari variasi tebal <i>tether</i> berukuran 0.5 μm dan 1 μm	41
Grafik 4.12. Grafik perpindahan dari variasi tebal <i>tether</i> berukuran 1.5 μm , 2 μm dan 2.5 μm	42
Grafik 4.13. Grafik persentase kesalahan dari variasi lebar <i>tether</i>	43
Grafik 4.14. Grafik perpindahan dari variasi tinggi desain.....	44
Grafik 4.15. Grafik persentase kesalahan dari variasi tinggi desain.....	45
Grafik 4.16. Grafik perpindahan dari variasi <i>gap</i> kecil.....	47
Grafik 4.17. Grafik persentase kesalahan dari variasi <i>gap</i> kecil.....	48
Grafik 4.18. Grafik perpindahan dari variasi <i>gap</i> besar.....	49
Grafik 4.19. Grafik persentase kesalahan dari variasi <i>gap</i> besar.....	50
Grafik 4.20. Grafik perpindahan dari variasi panjang <i>finger</i> berukuran 25 μm dan 50 μm	51
Grafik 4.21. Grafik perpindahan dari variasi panjang <i>finger</i> berukuran 75 μm , 100 μm dan 125 μm	52
Grafik 4.22. Grafik persentase kesalahan dari variasi panjang <i>finger</i>	53
Grafik 4.23. Grafik perpindahan dari variasi tebal <i>finger</i>	54
Grafik 4.24. Grafik persentase kesalahan dari variasi tebal <i>finger</i>	55

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, aplikasi *microelectromechanical systems* (MEMS) telah berkembang dengan sangat pesat. Hal ini terlihat dari kemunculan-kemunculan divais-divais baru yang merupakan miniaturisasi dari divais-divais yang berfungsi serupa. Namun, perancangan desain dari berbagai divais tersebut merupakan hal yang sulit. Oleh karena itu, alat bantu CAD (*computer-aided design*) sangat diperlukan untuk mendukung pendesainan sistem-sistem divais tersebut [1].

Pada dua dekade akhir ini bidang *microelectromechanical systems* (MEMS) berkembang dari penciptaan divais sederhana menjadi penciptaan divais yang memiliki sistem yang lebih kompleks. Melihat arah perkembangan ini, alat bantu *computer-aided engineering* (CAE) untuk MEMS memegang peranan yang semakin penting. *Tool* CAE telah berhasil mensimulasi divais-divais sederhana. Namun, pada desain yang lebih kompleks, meskipun simulasi berhasil dilakukan tetapi waktu yang diperlukan sangat lama [14]. Karena kapabilitas dari simulator-simulator konvensional tersebut sangat rendah, maka para desainer MEMS sering harus menggunakan kalkulasi secara manual untuk menganalisa desain-desain yang dibuat [1]. Selain itu, program-program simulator MEMS tersebut sulit untuk diperoleh karena harganya yang sangat mahal.

Program simulator alternatif, SUGAR, yang tersedia dengan gratis menjadi salah satu simulator alternatif bagi para desainer MEMS untuk melakukan simulasi perpindahan pada MEMS. Simulator SUGAR menggunakan program MATLAB sebagai basis untuk menjalankan fungsi-fungsinya. Program MATLAB sendiri telah menjadi salah satu program yang lazim dipakai oleh individu yang berkecimpung di dalam bidang *engineering* sehingga para desainer MEMS tidak akan mengalami kendala untuk menjalankan simulator SUGAR. Selain itu, fungsi-fungsi SUGAR yang telah terintegrasi dalam MATLAB dan tergolong fungsi-fungsi yang cukup sederhana. Bahkan, beberapa

fungsi-fungsi dari MATLAB bisa dipakai untuk mendukung proses-proses simulasi. Kelebihan-kelebihan ini didukung oleh sifat SUGAR yang *open-source* sehingga mudah didapatkan. Kelebihan-kelebihan ini menjadikan SUGAR sebagai salah satu alternatif simulator MEMS yang baik dan cocok bagi kalangan akademis maupun pengembang-pengembang MEMS. Oleh karena itu, pada skripsi ini penulis mengangkat tema uji keakuratan simulator SUGAR dengan pendekatan linear dalam mengkaji lebih dalam tingkat keakuratan simulator SUGAR.

1.2. Tujuan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengeksplorasi keakuratan dari program simulator SUGAR dalam simulasi perpindahan yang terjadi pada desain-desain akselerator MEMS kapasitif ketika diaplikasikan tegangan. Hal-hal yang akan dievaluasi dalam skripsi ini adalah karakteristik-karakteristik umum dari alat bantu simulasi yang baik, yaitu keakuratan hasil simulasi, kecepatan simulasi, fleksibilitas terhadap desain, kemampuan menangani beberapa simulasi fisika secara bersamaan, serta kemampuan mengevaluasi efek fisik yang bagus.

1.3. Pembatasan masalah

Materi dari skripsi meliputi eksplorasi keakuratan program simulator SUGAR dalam simulasi perpindahan desain akselerator MEMS kapasitif akibat pemberian tegangan. Pembahasan difokuskan pada eksplorasi keakuratan SUGAR dengan membandingkan hasil simulasi SUGAR dengan hasil kalkulasi. Hasil kalkulasi yang digunakan sebagai materi perbandingan didapat melalui hasil kalkulasi dengan pendekatan linear. Eksplorasi keakuratan simulator tersebut kemudian diuji lebih lanjut dengan memvariasikan parameter-parameter desain.

1.4. Sistematika penulisan

Penulisan skripsi ini terbagi dalam lima bab. Pembahasan bab-bab tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut :

- Bab 1 : Pendahuluan
Bab ini membahas tentang latar belakang, tujuan, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan dari penulisan skripsi ini.
- Bab 2 : Dasar Teori
Bab ini membahas tentang konsep-konsep dasar dari akselerator MEMS dan program simulator SUGAR.
- Bab 3 : Metodologi penelitian
Bab ini membahas mengenai materi dan proses dari penelitian.
- Bab 4 : Hasil percobaan
Bab ini membahas mengenai analisis hasil-hasil simulasi dan kalkulasi yang dilakukan.
- Bab 5 : Kesimpulan
Bab ini menyimpulkan keseluruhan hasil yang didapat dari proses percobaan yang dilakukan.

BAB 2 DASAR TEORI

2.1. Akselerometer MEMS kapasitif

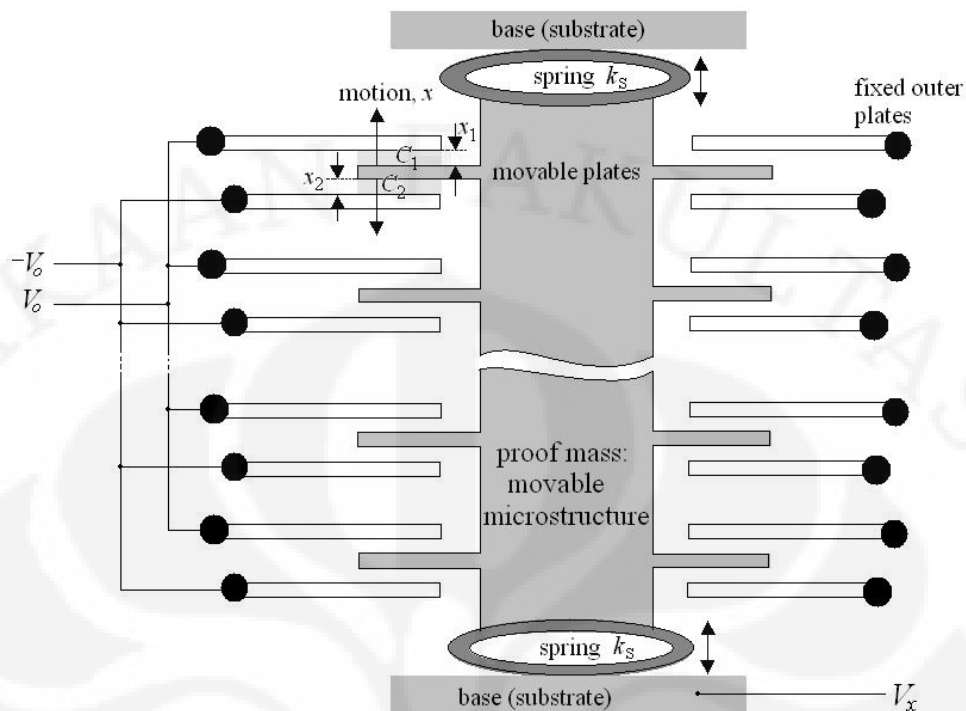
2.1.1. Konsep dasar

Akselerometer MEMS kapasitif banyak diaplikasikan dewasa ini karena sederhana dan aplikatif. *Interface* kapasitif pada akselerometer tersebut memiliki beberapa fitur-fitur yang menarik. Pada kebanyakan teknologi mesin mikro, proses tambahan umumnya tidak lagi diperlukan dalam fabrikasi. Kapasitor-kapasitor tersebut dapat berfungsi sebagai sensor dan aktuator. Kapasitor memiliki sensitivitas yang bagus dan mekanisme transduksi yang tahan terhadap temperatur. Pendeteksian kapasitif tidak bergantung pada material dasar, melainkan bergantung pada variasi kapasitansi ketika geometri dari kapasitor berubah [13]. Dengan mengabaikan efek *fringing*, kapasitansi dari plat yang paralel adalah :

$$C_o = \epsilon_0 \epsilon_A \frac{A}{d} = \epsilon_A \frac{1}{d} \quad (1)$$

Dimana nilai $\epsilon_A = \epsilon_0 \epsilon_A$ dan A merupakan luas penampang dari elektroda, d merupakan jarak antar plat elektrostatis dan ϵ merupakan permitivitas dari material di antara kedua plat elektroda tersebut. Perubahan pada salah satu parameter ini akan mengakibatkan perubahan kapasitansi dan variasi dari setiap variabel ini telah diaplikasikan dalam aplikasi sensor MEMS. Secara umum, variasi dari aplikasi akselerometer terbagi dua, yakni akselerometer yang berprinsip pada perubahan nilai d dan akselerometer yang berprinsip pada pergerakan A [12]. Kedua akselerometer tersebut berbeda dalam hal arah pergerakan yang terjadi akibat pengaplikasian gaya.

Akselerometer MEMS pada umumnya terbentuk dari *proofmass* yang dapat bergerak. *Proofmass* terpasang di sistem suspensi mekanik pada kerangka seperti pada gambar 2.1. Plat-plat yang dapat digerakkan dan plat-plat luar yang tetap merepresentasikan kapasitor-kapasitor pada sistem tersebut. Defleksi dari *proofmass* dapat diukur dengan menggunakan selisih kapasitansi [13].



Gambar 2.1. Struktur akselerometer [13]

Kapasitansi udara di antara plat yang dapat digerakkan dan dua plat luar yang tetap C_1 dan C_2 merupakan fungsi dari perpindahan x_1 dan x_2 :

$$C_1 = \epsilon A \frac{1}{x_1} = \epsilon A \frac{1}{d+x} = C_0 - \Delta C, \quad C_2 = \epsilon A \frac{1}{x_2} = \epsilon A \frac{1}{d-x} = C_0 + \Delta C \quad (2)$$

Jika akselerasi yang terjadi bernilai nol, kapasitansi C_1 dan C_2 akan sama karena nilai $x_1 = x_2$. Perpindahan dari x ini diakibatkan oleh akselerasi yang terjadi. Jika nilai $x \neq 0$, selisih kapasitansi akan dapat di hitung seperti berikut :

$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = 2\epsilon A \frac{x}{d^2 - x^2} \quad (3)$$

Peneliti-peneliti menfokuskan dalam pemodifikasian bentuk geometris dari akselerometer MEMS untuk bervariasi metode pendeteksian kapasitifnya agar dihasilkan performa maksimal. Performa dari akselerometer MEMS kapasitif dimaksimalkan berdasarkan sistem *mass-spring-damp* sehingga terdapat tiga parameter utama yang dapat dimodifikasi (massa, konstanta pegas,

dan koefisien *damping*). Salah satu contoh sederhana dari bentuk geometri dari *proofmass* adalah bentuk *Fishbone*. Bentuk *proofmass* dari MEMS bergeometri *fishbone* terdiri atas *finger-finger* yang berbentuk seperti tulang ikan (*fishbone*) atau sisir. (Park et al. 1998,1999)[4]. Bentuk geometri ini akan tampak seperti pada gambar 2.1. Bentuk geometri demikian merupakan modifikasi dari bentuk geometri *fishbone* yang sederhana dengan menggunakan dua baris elektroda berbentuk sisir. Setiap sensor pada MEMS tersebut memiliki banyak kapasitor. Struktur hanya dapat bergerak naik turun. Namun, pada kasus lain pergerakan ke arah lain dapat terjadi tergantung dari desain akselerometer tersebut. Plat yang bergerak dan tidak bergerak akan berfungsi untuk menciptakan kapasitansi. Seluruh kapasitor-kapasitor bagian atas dihubungkan paralel dengan sebuah sumber tegangan, V_0 , sedangkan untuk bagian bawah dihubungkan pada sumber tegangan, $-V_0$. Jika hal ini tidak dilakukan, selisih kapasitansi tidak dapat terdeteksi [5].

Aplikasi MEMS cocok dalam aplikasi-aplikasi optik karena divais-divais tersebut dapat dicocokkan dengan panjang gelombang optik dan dapat diproduksi dalam jumlah besar [6]. Karakteristik-karakteristik MEMS yang menjadi keunggulannya mulai menggantikan *switches* dalam pengiriman data optik dan filter. Hal ini dilakukan melalui MEMS aktuator [8]. Proses yang paling umum dalam divais-divais MEMS adalah aktuasi di mana memanfaatkan gerakan mekanik, gaya-gaya, maupun bekerja berdasarkan sistem di sekitarnya akibat dari pemberian tegangan atau arus. Salah satu tipenya adalah elektrostatis. Divais-divais berbasis MEMS telah banyak digunakan dalam beberapa aplikasi seperti sensor biomedikal, miniatur alat-alat biomedikal, sistem pengaturan kardiak, stimulasi syaraf, kontrol dorongan pada mesin, keamanan otomotif, sistem rem dan suspensi, komponen-komponen telekomunikasi optik, sistem penyimpanan data, proses sinyal elektromekanik, serta aplikasi militer. Mekanisme dari divais-divais tersebut bekerja dengan memanfaatkan sebuah sumber tegangan konstan atau sumber arus konstan agar terjadi aktuasi elektrostatis atau pendeteksian kapasitif [2].

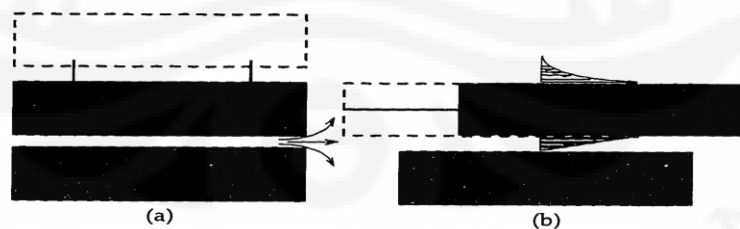
Gaya elektrostatis yang terjadi akibat pemberian tegangan yang naik secara konstan akan bernilai non-linear, dan menyebabkan sebuah fenomena

yang dikenal dengan istilah *'pull-in'* apabila telah mencapai sebuah nilai tegangan tertentu yang disebut dengan tegangan *pull-in*. Penentuan tegangan *pull-in* yang akurat sangat penting dalam sebuah proses desain untuk menentukan tingkat sensitivitas, respon terhadap frekuensi, ketidakstabilan, distorsi, dan cakupan dinamik dari divais [9]. Oleh karena itu, simulasi secara ekstensif dilakukan dengan cara mengvariasikan dimensi dari desain-desain divais tersebut agar tercipta sebuah desain yang ideal dan stabil [2].

2.1.1.1. *Damping*

Damping merupakan sebuah mekanisme disipasi yang dominan pada struktur mikron yang beroperasi dalam domain tekanan udara [15]. *Damping* yang terjadi pada desain *fish-bone* diakibatkan oleh gerakan vertikal atau gerakan saling mendekati antar plat-plat elektroda pada desain *fish-bone*. Gerakan tersebut akan menciptakan sebuah tekanan pada udara yang berada pada *gap* diantara plat-plat finger.

Terdapat dua macam *damping*, yakni *squeeze film damping* dan *viscous drag damping*. Kedua jenis *damping* ini berlaku bergantung pada gerakan dari gerakan elemen inersial dan elektroda relatif terhadap struktur yang tidak bergerak. *Squeeze film damping* merupakan mekanisme yang dominan pada struktur pendektaksian yang beroperasi dengan penvariasian *gap*, sedangkan *viscous drag damping* beroperasi dengan menvariasikan luas permukaan struktur [15].



Gambar 2.2. (a) *squeeze film damping* dan (b) *viscous film damping* [15]

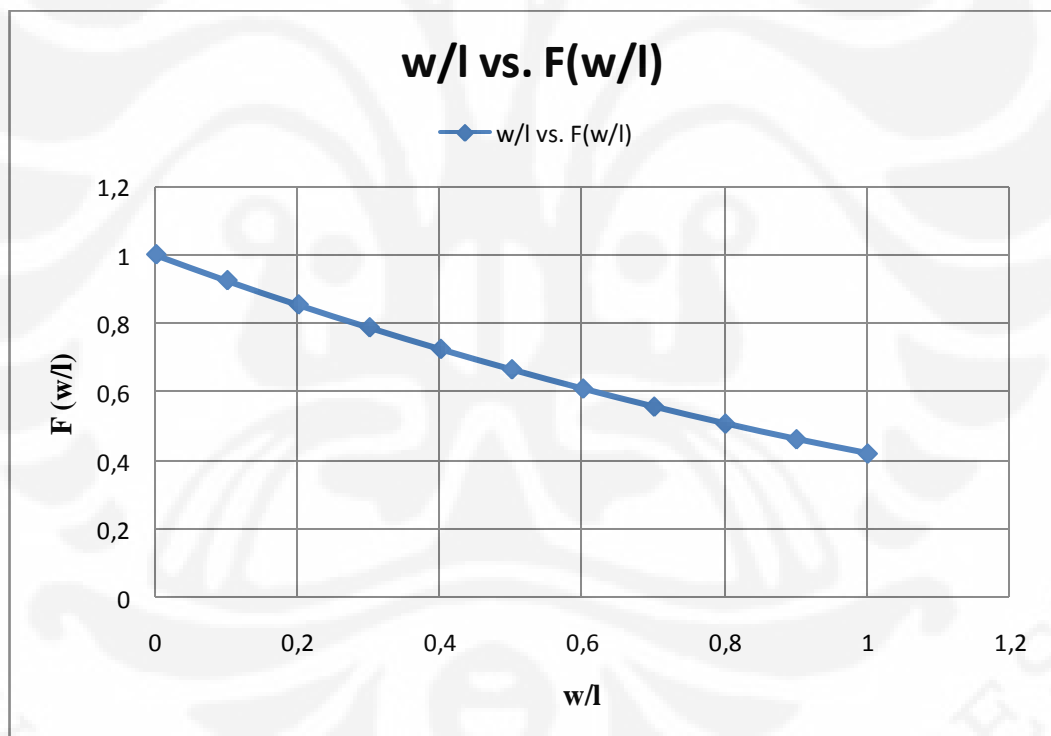
2.1.1.1.1. *Squeeze Film Damping*

Damping squeeze merupakan jenis *damping* yang terjadi akibat perubahan *gap* antara kedua plat elektroda seperti yang diilustrasikan pada

gambar 2.2. (a). Plat yang bergerak turun akan menekan udara yang terdapat dalam gap sehingga terjadi *squeeze film damping*. Faktor *damping* b pada kasus tersebut dapat kita rumuskan dalam persamaan :

$$b = f(W/L)\mu \frac{W^3 L}{d^3} \quad (4)$$

di mana, μ merupakan nilai viskositas absolut dari zat lingkungan yang mengelilingi massa, d merupakan jarak antara kedua plat elektrostatik, W dan L merupakan sisi kecil dan besar dari luas penampang plat yang berbentuk persegi. Fungsi $f(W/L)$ merupakan sebuah angka koefisiensi yang bergantung pada aspek rasio perbandingan dari dimensi plat seperti yang terlihat pada gambar 2.3 [14].



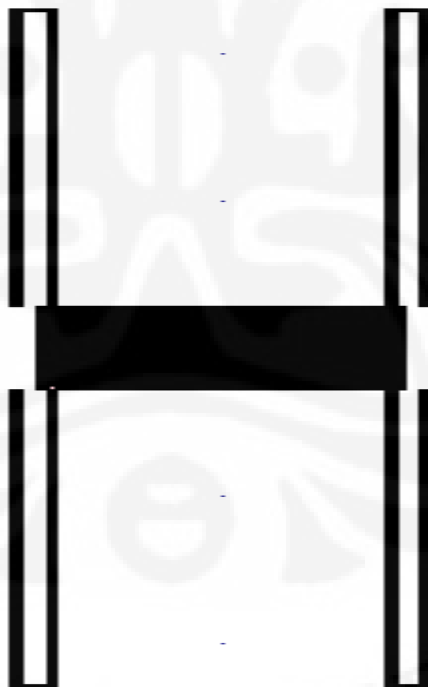
Gambar 2.3. Plot dari fungsi (W/L) berbanding dengan nilai rasio perbandingan sisi plat yang bergerak (W/L)

2.1.1.2. Konstanta pegas

Sensitivitas dari sebuah akselerometer sangat bergantung pada nilai konstanta pegas. Konstanta pegas harus bernilai lebih kecil pada arah

pendeteksi akselerasi [14]. Sebaliknya, pada arah lainnya nilai dari konstanta pegas harus bernilai sangat besar agar tidak mempengaruhi nilai sensitivitas dari arah pendeteksi yang diinginkan. Pemakaian struktur *beam* dikarenakan strukturnya yang mudah untuk di-mesin mikro. Defleksi kecil, seperti pada kebanyakan keluaran dari divais-divais MEMS, pada struktur *beam* proporsional secara linear dengan gaya deformasi yang diberikan. Hal ini menjadi alasan pemakaian struktur *beam* [14].

Bentuk-bentuk pegas-pun dibuat bermacam-macam tergantung pengaplikasiannya. Aplikasi MEMS akselerometer kapasitif memerlukan bentuk pegas yang lebih seimbang seperti desain *bridged*, *folded beams* atau *crab-leg*. Untuk aplikasi akselerometer dengan pergerakan lateral, desain *folded beams* merupakan desain yang paling cocok dibandingkan dengan desain *crab-leg* yang mengvariasikan nilai *spring constant* dengan merotasi struktur yang tersuspensi [14]. Oleh karena itu, desain pegas yang dipakai dalam simulasi merupakan desain *folded beams* dengan penopang lurus seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Desain pegas *crab-leg* dengan penopang lurus

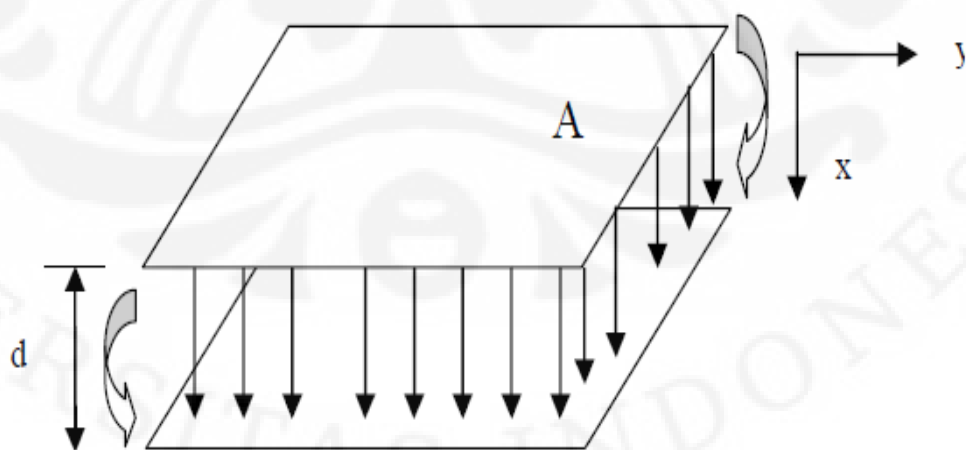
Nilai konstanta pegas k_x dan k_y dengan bentuk seperti pada gambar 2.4. dituliskan dalam persamaan berikut :

$$k_x = \frac{12EI(2+\alpha\beta)}{L_b^3(1+2\alpha\beta)} \quad (5)$$

$$k_y = \frac{48EI_b}{L_t^3\left(\frac{6}{\beta}+\alpha\right)} \quad (6)$$

2.1.1.3. Pemodelan dari aktuator elektrostatik

Aktuator elektrostatik memiliki respon yang cepat serta konsumsi daya yang rendah. Aktuator elektrostatik lebih kurang sensitif terhadap kondisi lingkungan dibandingkan dengan aktuator lainnya sehingga gangguan dari luar tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada sensitivitas desain. Struktur dari aktuator ini terdiri atas dua metal yang dipisahkan oleh *gap* udara seperti yang terlihat pada gambar 3.5. Kemudian tegangan bias akan diberikan di antara kedua struktur metal tersebut sehingga tercipta perbedaan muatan. Hal ini akan menciptakan gaya elektrostatik yang dapat digunakan untuk mengurangi gap di antara plat-plat tersebut seperti yang terlihat pada gambar 3.5 [2].



Gambar 2.5. Struktur skematik dari plat kapasitor paralel [2]

Kedua plat tersebut memiliki luas penampang yang saling tumpang tindih sebesar A dan berjarak sebesar d . Konstanta dielektrik atau permitivitas elektrik relatif dari media di antara kedua plat tersebut dinotasikan ϵ_r . Permitivitas dari media adalah $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, di mana ϵ_0 merupakan permitivitas dari ruang vakum [10]. Pada umumnya, nilai permitivitas yang diperhitungkan hanya nilai permitivitas ruang vakum di antara kedua plat tersebut.

Nilai kapasitansi C , diantara kedua plat paralel tersebut dapat ditulis dalam persamaan :

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (7)$$

Jika plat tersebut bergerak, *gap* di antara kedua plat tersebut akan berubah dan besar dari gaya yang diberikan dapat kita tuliskan seperti persamaan berikut :

$$F = \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{d^2} V^2 = \frac{1}{2} \frac{C V^2}{d} \quad (8)$$

di mana dimensi normal berubah dari x menjadi d [2].

Dalam keadaan setimbang, pemodelan sistem perpindahan dari desain dapat dituliskan dalam persamaan :

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_{electric} \quad (9)$$

Dengan metode Laplas dan deret Taylor didapatkan persamaan perpindahan x dalam domain s , yaitu :

$$x(s) = \frac{k_1 d_1 - k_2 d_2}{[Ms^3 + bs^2 + (k - k_1 + k_2)s]} \quad (10)$$

Perpindahan tersebut akan terjadi hingga tegangan yang diberikan menyebabkan sistem mencapai keadaan setimbang. Pemberian tegangan yang melebihi tegangan pada saat keadaan setimbang akan mengakibatkan terjadinya

kondisi *pull-in*, di mana kedua plat elektrostatis yang berdekatan akan terjadi kontak. Tegangan yang menciptakan kondisi tersebut merupakan sebuah tegangan bias yang disebut dengan tegangan *pull-in*. Nilai tegangan *pull-in* dapat dirumuskan dalam persamaan berikut :

$$v_{pi} = \frac{2d}{3} \sqrt{\frac{K_m d}{1.5\epsilon A}} \quad (11)$$

2.2. Simulator SUGAR

SUGAR merupakan sekumpulan fungsi-fungsi yang diintegrasikan dalam MATLAB [17] yang mengimplementasikan pendekatan analisis nodal dalam simulasi MEMS. Masukan dari SUGAR merupakan sebuah *file* berisi teks yang menggambarkan blok-blok bangunan geometri, serta informasi-informasi seperti tegangan, gaya, serta karakteristik-karakteristik dari desain. Format umum dari masukan adalah tipe blok, titik, geometri dan parameter. Tipe-tipe blok dan fungsi umum yang telah tersedia meliputi *beam* planar, *anchor*, *gap* elektrostatis, dan pemberi gaya. [16].

Model-model balok yang tersedia pada simulator SUGAR adalah :

- Model *anchor*

Anchor merupakan pilar mekanik yang mendukung struktur-struktur tersuspensi. Blok-blok ini merupakan elemen tersuspensi yang digabungkan dengan struktur yang dapat bergerak. Seperti namanya, *anchor* berfungsi sebagai sebuah elemen yang tidak bergerak pada desain. Oleh karena itu, model *anchor* pada SUGAR dirancang sebagai sebuah elemen kaku yang ideal dengan kekakuan senilai tak terhingga. Dengan demikian, tidak akan terjadi perpindahan pada titik-titik pada elemen *anchor* tersebut[22].

- Model *beam*

Model ini merupakan blok-blok yang dapat bergerak. Model *beam* merupakan elemen penting dalam desain MEMS tersuspensi karena memiliki karakteristik seperti sebuah pegas. *Beam* memiliki sifat-sifat mekanik yang berasal dari efek-efek fisik seperti pembengkokan, torsi, kompresi, dan

sebagainya. Karakteristik ini penting untuk menentukan sifat dari *beam* ketika diberikan masukan gaya atau tegangan. Titik-titik pembentuk blok *beam* akan bergerak menuju titik-titik translasi apabila diberikan masukan tegangan ataupun gaya [22]. Translasi dari poin-poin tersebut merepresentasikan perpindahan yang terjadi akibat dari pemberian tegangan atau gaya.

2.2.1. Representasi MEMS dalam SUGAR

Dalam sebuah skema desain pada SUGAR, setiap elemen blok pada desain direpresentasikan oleh sekumpulan titik [23]. Titik-titik tersebut akan dihubungkan satu dengan lainnya dengan prinsip-prinsip yang telah terimplementasikan dalam SUGAR untuk membentuk bentuk fisik dari blok-blok desain. Penggabungan dari blok-blok tersebut akan membentuk geometri dari desain dari akselerometer.

Pada *file-file* desain-desain MEMS, karakteristik dari setiap elemen blok yang terbentuk bergantung pada parameter-parameter karakteristik material seperti modulus Young dan kerapatan [22]. Informasi-informasi seperti ketebalan lapisan, modulus Young dan konstanta-konstanta lainnya tersebut akan didefinisikan dalam *file netlist*. Dengan informasi tersebut, SUGAR akan menciptakan matriks-matriks secara individual untuk massa, *damping*, dan *stiffness* untuk setiap struktur blok yang didefinisikan dalam *file netlist* [16]. Persamaan dari gerakan dinamik pada sistem yang dibangun tersebut dapat dijabarkan dalam bentuk persamaan yang familiar, yaitu [20]:

$$M\{\ddot{q}\} + D\{\dot{q}\} + K\{q\} = \{F\} \quad (12)$$

di mana koefisien-koefisien M , D , dan K merepresentasi matriks massa, *damping* dan derajat kekakuan sistem. Matriks $\{q\}$ pada persamaan tersebut merepresentasikan perpindahan yang terjadi pada titik-titik dalam desain. Isi dari matriks $\{q\}$ adalah $\{x_1 y_1 \theta_1 \dots x_N y_N \theta_N\}$. Matriks q merupakan sebuah matriks vektor dengan jumlah kolom $1 \times 3N$ dan N merupakan jumlah dari node yang terdapat pada desain [16]. Matriks $\{F\}$ merepresentasi gaya yang diaplikasikan pada titik-titik yang terdapat pada desain. Matriks ini juga merupakan sebuah matriks

$$\begin{bmatrix}
 \frac{1}{B_x 3} & \frac{13}{B_y 35} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{13}{B_x 35} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{111}{B_z 210} \\
 \frac{13}{B_y 35} & \frac{13}{B_x 35} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{13}{B_z 35} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{111}{B_z 210} \\
 \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{111}{B_z 210} \\
 \frac{13}{B_x 35} & \frac{13}{B_z 35} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{13}{B_x 35} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{111}{B_z 210} \\
 \frac{9}{B_y 70} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{9}{B_y 70} & \frac{9}{B_y 70} \\
 \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_z 420} & \frac{131}{B_z 420} \\
 \frac{131}{B_y 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{131}{B_y 420} & \frac{131}{B_y 420} \\
 \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210} & \frac{111}{B_z 210}
 \end{bmatrix}
 = [B]
 \quad (15)$$

di mana :

μ = viskositas

Δ = gap

L = panjang *beam*

w = lebar

h/t = ketebalan desain

I = momen inersia

E = modulus Young

J = Momen polar dari area

ν = Rasio Poisson

D = Matriks damping 3D, [B]

A = tw, luas penampang

ρ = kerapatan material

Matriks-matriks representasi elemen pada persamaan (13), (14) dan (15) merupakan elemen lokal atau individu dari sistem koordinat. Tiap-tiap elemen memiliki orientasi masing-masing sehingga perlu untuk dirotasikan menjadi sebuah sistem koordinat global yang sama sebelum dibentuk dalam sebuah sistem matriks-matriks. Transformasi tersebut dilakukan dengan menggunakan sebuah matriks transformasi T_i . Transformasi tersebut dapat ditemukan dengan persamaan berikut :

$$q_{i,global} = T_i q_{i,local} \quad (16)$$

$$F_{i,global} = T_i^T F_{i,local} \quad (17)$$

$$M_{i,global} = T_i^T M_{i,local} T_i \quad (18)$$

$$D_{i,global} = T_i^T D_{i,local} T_i \quad (19)$$

$$K_{i,global} = T_i^T K_{i,local} T_i \quad (20)$$

di mana matriks transformasi, T_i dari persamaan (16) hingga (20) merupakan sebuah matriks kosinus [18]. Matriks kosinus itu dapat dijabarkan seperti berikut [20] :

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

di mana θ merupakan orientasi dari struktur yang diukur berlawanan dengan arah jarum jam dari sumbu x positif.

2.2.2. Residual Stress

Metode yang digunakan untuk menentukan nilai dari keseimbangan statik akibat dari *stress* dan *strain gradient* adalah :

$$\text{static deflection, } q = -K^{-1} F_{stress} \quad (22)$$

$$F_{stress} = A\sigma \quad (23)$$

dimana $\sigma > 0$ menandakan *beam* memendek dan $\sigma < 0$ menandakan *beam* memanjang [18].

2.2.3. Gap Elektrostatik

Gaya yang terdistribusi sepanjang *beam* akibat dari gaya elektrostatik harus dirubah kedalam bentuk gaya node ekuivalen dan momen-momen karena SUGAR beroperasi berdasarkan node. Hal ini dilakukan dengan cara mengintegrasikan nilai dari beban elektrostatik $p(x)$ dikalikan dengan fungsi bentuk Hermitian $H(x)$ sepanjang *beam* [16].

$$F_{Electrostatic, i} = \int_0^L p(x)H_i(x)dx \quad (24)$$

$$p(x) = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 h V^2 \alpha(d(x))}{d(x)^2} \quad (25)$$

di mana : $H_i(x)$ = Fungsi bentuk Hermitian

$p(x)$ = beban elektrostatik

V = tegangan

$d(x)$ = jarak *gap*

ϵ_0 = permitivitas dari ruang hampa

h = ketebalan lapisan

$\alpha(x)$ = faktor *fringing field*

2.2.4. Analisis

Analisis planar seperti analisis DC, *steady-state* dan transien dari desain MEMS pada SUGAR juga dikerjakan dengan sejumlah fungsi-fungsi MATLAB. Dengan memakai fungsi $dq = cho_dc(netlist)$, SUGAR akan mengaplikasikan analisis DC pada desain *netlist* yang didefinisikan pada fungsi tersebut. Analisis tersebut akan mencari kondisi kesetimbangan dari sistem sehingga bisa didefinisikan besar perpindahan nodal yang terjadi saat desain *netlist* tersebut diberikan sebuah gaya mekanikal atau elektrostatik [16].

Dalam analisis DC, posisi setimbang akibat dari gaya mekanikal dan tegangan dapat direpresentasikan dalam sebuah persamaan sederhana [16]:

$$[K]\{q\} - \{F\} = 0 \quad (26)$$

dengan menggunakan persamaan tersebut dapat didefinisikan besar perpindahan yang terjadi pada desain jika desain diberikan sebuah gaya mekanikal maupun elektrostatik. Terdapat beberapa metode untuk menyelesaikan persamaan tersebut. SUGAR menggunakan modifikasi algoritma Newton-Raphson untuk menemukan keadaan seimbang dan perpindahan desain ketika satu atau lebih elemen non-linear atau eksitasi-eksitasi diaplikasikan pada netlist.

SUGAR menyelesaikan persamaan perpindahan bukan berdasarkan persamaan (19), melainkan dengan persamaan yang lebih sederhana yaitu :

$$f(\{q\}) = 0 \quad (27)$$

Persamaan tersebut merepresentasikan sebuah keadaan di mana setiap nodal dari gaya, momen dan arus listrik berjumlah nol [18]. Secara umum, solusi iterasi pendekatan yang dipakai dalam metode pendekatan Newton-Raphson adalah :

$$\{q_{n+1}\} = \{q_n\} - [f'(\{q_n\})]^{-1}\{f(\{q_n\})\} \quad (28)$$

di mana $[f'(\{q_n\})]$ merupakan matriks sistem Jacobian. Iterasi akan berlanjut terus hingga tercapai kondisi :

$$\|q_{n+1} - q_n\| < \zeta \quad (29)$$

di mana ζ merupakan nilai toleransi.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Rancangan penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif, di mana data yang digunakan atau yang dianalisis merupakan data-data numerik (angka). Cara penganalisaan juga dilakukan dengan cara matematis [19].

Jenis penelitian yang dipilih disesuaikan dengan tujuan dari penelitian, yaitu mengeksplor keakuratan dari program simulator SUGAR dalam mensimulasi desain-desain dari MEMS akselerometer kapasitif. Dengan metode penelitian kuantitatif akan didapatkan gambaran mengenai keakuratan dari program SUGAR. Dari penelitian tersebut, diharapkan nantinya akan terdefiniskan seberapa akurat hasil simulasi dari program MEMS dibandingkan dengan hasil kalkulasi yang dilakukan secara manual.

Penggunaan pendekatan matematis yang digunakan dalam penelitian didasarkan pada beberapa pertimbangan berikut :

1. Angka-angka yang dijadikan acuan pembanding didapat melalui hasil kalkulasi sehingga mudah untuk dibandingkan dengan hasil-hasil yang didapat melalui simulasi.
2. Angka-angka hasil kalkulasi merupakan sebuah nominal pasti yang didapatkan melalui persamaan-persamaan yang telah ada sehingga dapat dipertanggung jawabkan.
3. Hasil-hasil simulasi yang ditampilkan dalam bentuk angka lebih mudah diamati serta lebih akurat dibandingkan dengan hasil pengamatan dalam bentuk animasi geometri.

Metode yang digunakan dalam kalkulasi merupakan metode pelaplasan dengan pendekatan linear. Alasan penggunaan metode ini adalah :

1. Pelaplasan fungsi kuadrat dari perpindahan, $x(t)$, yang tidak memungkinkan untuk dilakukan dengan metode konvolusi
2. Nilai x berbanding d yang kecil sehingga bisa diabaikan



Gambar 3.1. Bentuk umum desain MEMS akselerometer kapasitif yang disimulasikan

3.2. Lokasi dan waktu penelitian

Penelitian yang dilakukan berlangsung dari bulan Februari 2010 hingga bulan Juni 2010. Penelitian bersifat simulasi dan perbandingan data sehingga lokasi dari penelitian ini dapat dilakukan di mana saja dengan menggunakan sebuah unit komputer atau laptop.

3.3. *Input* simulasi

Pengambilan sampel masukan dari penelitian yang dilakukan bersifat *cluster sampling*, di mana pengambilan sampel yang dilakukan berasal dari kelompok-kelompok kecil yang sifat antar kelompok tersebut tidak menunjukkan tingkatan. Anggota-anggota kelompok ini tidaklah homogen. Pengelompokan dalam proses pengambilan sampel hanya ditujukan untuk mempermudah proses penelitian [19]. Metode proses pengambilan sampel ini dipakai untuk memaksimalkan hasil simulasi. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, tujuan dari simulasi adalah untuk mengeksplor keakuratan program simulator. Oleh karena itu, pengvariasian dari masukan desain simulasi sangat membantu dalam proses perbandingan hasil-hasil simulasi dan hasil-hasil kalkulasi.

Masukan dari simulasi merupakan sebuah *file netlist* yang mendeskripsikan bentuk dari MEMS akselerometer kapasitif yang akan disimulasikan. *File netlist* tersebut berisi teks yang menggambarkan blok-blok bangunan geometri, tegangan, serta hambatan dari desain MEMS yang dibuat [16]. Dalam *file netlist* tersebut juga ditentukan sifat-sifat dari material, serta konstanta-konstanta tetap yang dipakai seperti nilai viskositas, ephsilon, kerapatan, phi, poisson, modulus Young, permitivitas, dan konstanta-konstanta lainnya. Terdapat beberapa fungsi SUGAR yang dipakai dalam pembuatan bentuk-bentuk geometri desain *file netlist*, yaitu :

1. Beam3de

Membentuk *beam* elektrostatis berbentuk balok. Dalam fungsi ini ditentukan material, panjang, lebar, tinggi, dan resistansi dari *beam* yang dimunculkan.

2. Mfanchor

Membentuk sebuah *anchor* berbentuk balok. Seperti namanya, balok yang terbentuk berfungsi layaknya sebuah jangkar yang mensuspensi *beam* dalam posisi kaku dan *fixed* atau tidak bergerak. Dalam fungsi ini ditentukan material, panjang, lebar, tinggi, dan resistansi dari *anchor* yang dimunculkan.

3. Mfgap2de

Membentuk sepasang *finger* dengan *gap* tertentu. Kedua *finger* tersebut akan memiliki panjang yang sama. Dalam fungsi ini akan ditentukan material, panjang, lebar *finger* pertama, lebar *finger* kedua, tinggi *finger*, *gap*, serta resistansi dari kedua *finger* tersebut.

4. Mfeground

Mendefinisikan sebuah titik sebagai *ground*.

5. Mfvsrc

Mendefinisikan sebuah titik sebagai titik diberikannya tegangan sumber.

Dengan mengkombinasi penggunaan fungsi-fungsi SUGAR yang tersebut, akan terbentuk sebuah desain MEMS akselerometer kapasitif. Bentuk umum dari tampilan desain yang dibentuk untuk penelitian ini tampak pada gambar 3.1. Alasan penggunaan desain demikian adalah pengaplikasiannya yang luas, integrasi yang baik dengan komponen-komponen elektronik lainnya dalam SoC (*systems-on-chip*), serta mudah untuk divariasikan bentuknya [22].

3.4. Langkah-langkah penelitian

Tahap-tahap yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut :

1. Metode pengumpulan data

Metode yang digunakan untuk mengumpulkan data adalah metode studi pustaka. Desain-desain yang dibuat dibentuk berdasarkan ukuran desain dari referensi-referensi yang didapat, serta hasil-hasil kalkulasi hingga didapatkan desain yang ideal untuk menjalankan simulasi yang diinginkan. Bagian-bagian dari desain yang disesuaikan agar terbentuk desain ideal adalah :

- *Tether Beam*

Ukuran dari *tether beam* dibentuk berdasarkan hasil perhitungan agar ideal untuk aplikasi MEMS akselerometer kapasitif dengan pergerakan searah sumbu aksis x.

Tinggi dari *tether beam* ditambah, sedangkan panjang tiang penopangnya dikurangi agar nilai dari konstanta pegas k_x kecil. Sebaliknya, desain tersebut akan menghasilkan *tether* dengan nilai konstanta pegas k_y yang bernilai besar. Hal ini menyebabkan gerakan searah sumbu x merupakan gerakan yang paling dominan dalam desain ini.

Ketebalan atau lebar dari *beam tether* juga dikurangi untuk mengurangi nilai dari tegangan *pull-in* untuk memudahkan simulasi.

- *Finger*

Finger dari akselerometer juga dibuat lebih panjang agar nilai dari tegangan *pull-in* lebih kecil akibat dari penambahan luas penampang.

Kemudian, desain ideal yang terbentuk akan divariasikan bentuk geometrinya untuk mengetahui perubahan karakteristik yang terjadi. Variasi-variasi dari parameter yang diaplikasikan pada desain adalah :

- Tebal *tether*

Ketebalan dari *tether* pada desain divariasikan dari $0,5\mu\text{m}$ hingga $2,5\mu\text{m}$ dengan kenaikan sebesar $0,5\mu\text{m}$ di setiap desainnya.

- Panjang *tether*

Panjang dari *tether* pada desain divariasikan dari $50\mu\text{m}$ hingga $250\mu\text{m}$ dengan kenaikan sebesar $50\mu\text{m}$ di setiap desainnya.

- Lebar *tether*

Lebar dari *tether* pada desain, atau disebut juga dengan batang penopang dari *tether*, divariasikan dari $5\mu\text{m}$ hingga $8\mu\text{m}$ dengan kenaikan sebesar $1\mu\text{m}$ di setiap desainnya.

- Panjang *finger*

Panjang dari *finger* pada desain divariasikan dari $25\mu\text{m}$ hingga $125\mu\text{m}$ dengan kenaikan sebesar $25\mu\text{m}$ di setiap desainnya.

- Lebar *finger*
Lebar dari *finger* pada desain divariasikan dari $1\mu\text{m}$ hingga $2\mu\text{m}$ dengan kenaikan sebesar $0,5\mu\text{m}$ di setiap desainnya.
- Ketinggian atau ketebalan desain
Ketinggian atau ketebalan dari desain divariasikan antara $30\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$ dan $60\mu\text{m}$. Kedua desain terakhir merupakan kelipatan setengah dan dua dari desain awal yang menjadi desain acuan yang digunakan.
- Panjang *proofmass*
Panjang dari *proofmass* pada desain divariasikan antara $40\mu\text{m}$, $67\mu\text{m}$ dan $100\mu\text{m}$.
- Lebar *proofmass*
Lebar dari *proofmass* pada desain divariasikan antara $28\mu\text{m}$, $14\mu\text{m}$ dan $56\mu\text{m}$. Kedua desain terakhir merupakan kelipatan setengah dan dua dari desain awal yang menjadi desain acuan yang digunakan.
- *Gap*
Gap kecil (g_1) dan *gap* besar (g_2) di antara *finger-finger* pada desain akan divariasikan.
Variasi pada *gap* kecil dilakukan dengan kombinasi $g_1-g_2 : 5\mu\text{m}-8\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}-8\mu\text{m}$, dan $2\mu\text{m}-8\mu\text{m}$, sedangkan variasi pada *gap* besar dilakukan dengan kombinasi $g_1-g_2 : 2\mu\text{m}-3\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}-4\mu\text{m}$, dan $2\mu\text{m}-6\mu\text{m}$.

Setelah parameter-parameter dari desain divariasikan, masukan tegangan diaplikasikan pada desain-desain tersebut. Masukan tegangan yang diberikan dimulai dari nilai 0V hingga mencapai tegangan *pull-in* atau perpindahan yang terjadi pada desain akibat pemberian gaya elektrostatis mencapai nilai sepertiga dari *gap* kecil. Pengambilan data hasil perpindahan dilakukan setiap kenaikan 1V tegangan yang diaplikasikan pada desain baik itu pengambilan data simulasi maupun pengambilan data hasil kalkulasi. Namun, untuk pengambilan data hasil perpindahan dengan nilai tegangan *pull-in* yang sangat besar, pengambilan data hasil perpindahan diambil setiap kenaikan tegangan sebesar 2V . Pengambilan data akan dilakukan

hingga perpindahan yang terjadi pada desain mencapai atau melewati nilai sepertiga dari nilai *gap* kecil desain.

2. Simulasi

File-file netlist yang telah dibentuk akan disimulasikan dengan fungsi-fungsi yang ditulis dalam M-file MATLAB. Fungsi-fungsi yang dipakai dalam M-file MATLAB adalah :

- Cho_load
Fungsi ini berfungsi untuk mengidentifikasi *file netlist* yang akan disimulasikan
- Cho_display
Fungsi ini berfungsi untuk menampilkan bentuk desain yang disimulasikan baik sebelum atau sesudah diaplikasikan gaya. Tampilan desain yang ditampilkan bergantung pada peletakan penulisan dari cho_display pada M-file MATLAB itu sendiri.
- Cho_dc
Fungsi ini berfungsi untuk menjalankan analisis statik pada *file netlist* yang telah didefinisikan sebelumnya dengan fungsi cho_load.
- Dqval
Fungsi ini berfungsi untuk mendefinisikan dan menampilkan nominal dari perpindahan yang terjadi pada sebuah titik dalam desain yang telah diaplikasikan analisis statik dengan fungsi cho_dc. Titik serta aksis arah perpindahan yang ingin dicari dapat didefinisikan dalam fungsi dqval.

3. Pendataan

Hasil simulasi yang didapatkan untuk setiap desain akan dicatat. Pada tahap ini, ukuran-ukuran dari masing-masing desain juga didefinisikan agar memudahkan proses pada tahap-tahap selanjutnya.

4. Perbandingan serta analisis data-data hasil penelitian

Pada fase ini, hasil-hasil simulasi yang dicatat akan dibandingkan dengan hasil-hasil yang didapatkan dari kalkulasi. Data-data tersebut akan

dibandingkan satu sama lainnya dan kemudian dihitung persen perbedaannya. Kemudian, dari data-data yang didapatkan bisa dianalisis seberapa handal program yang dipakai dalam mensimulasi desain-desain tersebut. Dari hasil-hasil analisis tersebut, akan didapatkan sebuah generalisasi atau kesimpulan untuk membuktikan keakuratan program simulator yang dipakai.

5. Tahap penulisan laporan

Tahap ini merupakan tahap terakhir dari penelitian yang dilakukan setelah menyelesaikan tahap-tahap sebelumnya. Penulisan laporan ini bertujuan untuk studi akademis.

Penulisan laporan hasil penelitian ini ditulis berpedoman pada syarat-syarat penulisan laporan tugas akhir atau skripsi yang telah ditentukan oleh Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

3.5. Analisis data

Analisis data dalam penelitian ini berupa pencatatan hasil simulasi, pengelompokan hasil-hasil sesuai desain, perbandingan hasil simulasi yang didapatkan dengan hasil kalkulasi, sampai verifikasi hasil analisis yang dilakukan.

Data-data yang didapatkan dari hasil simulasi akan dibandingkan dengan hasil-hasil yang didapat dari hasil kalkulasi. Kemudian, hasil-hasil perbandingan tersebut dianalisis untuk menyimpulkan keefektifan proses simulasi yang dikerjakan oleh program simulator SUGAR.

Hasil-hasil kalkulasi yang dijadikan acuan perbandingan didapatkan melalui penurunan rumus gaya elektrostatis yang dihasilkan oleh tegangan *pull-in*. Penurunan rumus ini telah dijabarkan pada bab lampiran.

Beberapa tahap kegiatan analisis data yang dikerjakan dapat dibagi dalam beberapa tahapan, yaitu :

1. Pencatatan

Hasil-hasil yang didapat dari simulasi akan didata satu per satu sesuai dengan desain-desainnya. Ukuran-ukuran dari desain yang

disimulasikan juga didefinisikan satu per satu untuk memudahkan proses perbandingan dan penganalisaan hasil penelitian.

2. Perbandingan

Hasil-hasil yang telah didata tersebut akan dibandingkan dengan hasil-hasil yang didapatkan melalui kalkulasi. Kemudian dari persen perbedaan yang dihitung, dianalisis dan disimpulkan kinerja dari program simulator yang dipakai

3. Verifikasi hasil

Verifikasi kebenaran dari hasil-hasil yang didapatkan. Tahapan ini diperlukan untuk menguji kebenaran dari hasil-hasil maupun kesimpulan yang diambil. Verifikasi hasil ini dilakukan sepanjang proses analisis data dilakukan.

BAB 4 ANALISIS PENELITIAN

Dalam pengujian ketelitian pengukuran dengan menggunakan simulator SUGAR, hasil yang didapatkan dari simulator SUGAR dengan simulasi berbasis metode pendekatan Newton-Raphson akan dibandingkan dengan hasil kalkulasi dengan pemakaian metode pelaplasan dengan pendekatan linear seperti yang telah dijabarkan dalam bab lampiran. Observasi dilakukan dengan memvariasikan beberapa parameter pada desain MEMS akselerometer kapasitif. Kemudian, observasi dilanjutkan ke penganalisaan grafik hasil perpindahan kalkulasi dan SUGAR, serta grafik persentase kesalahan yang terjadi.

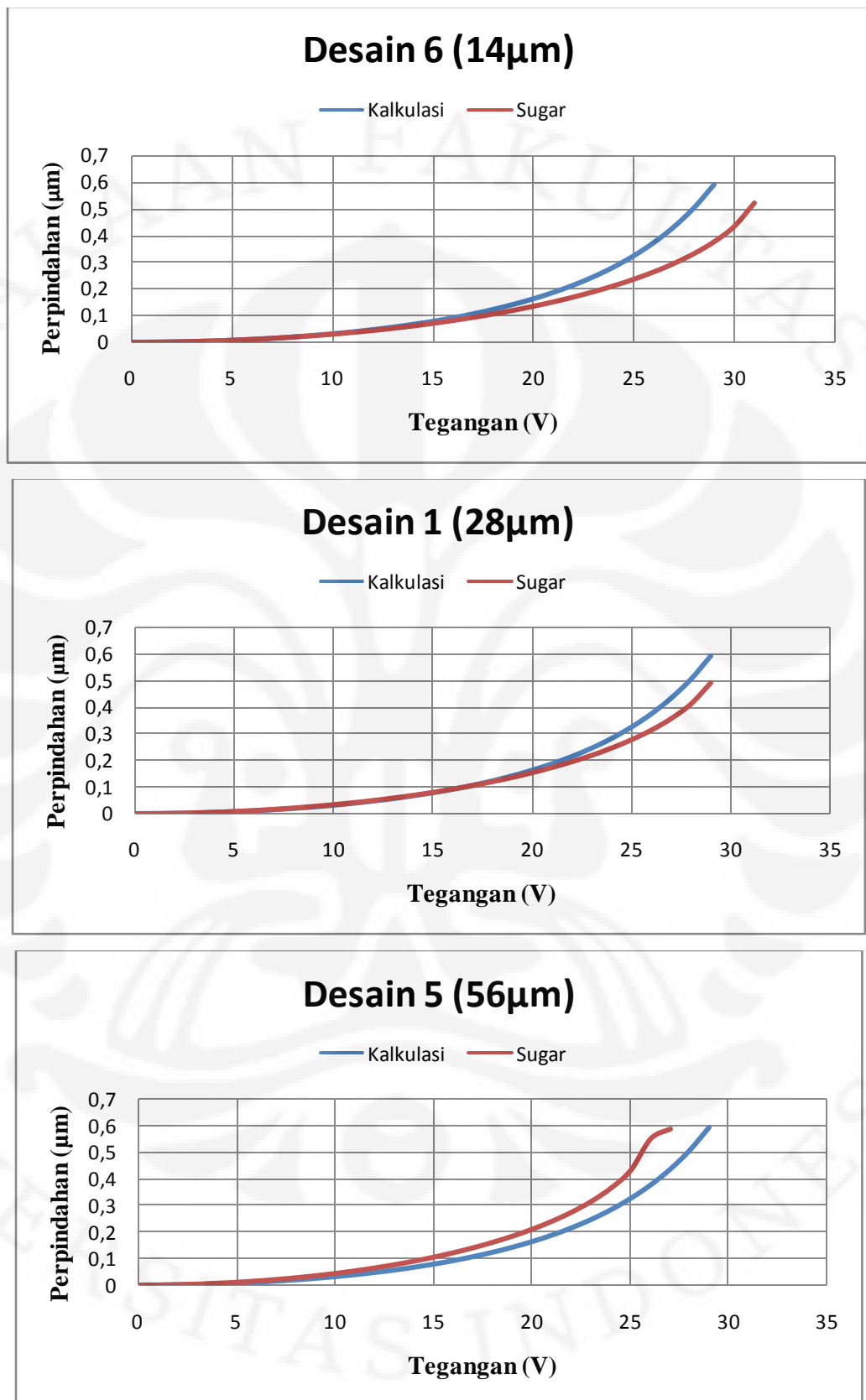
4.1. Analisa grafik

4.1.1. Variasi lebar *proofmass*

Variasi parameter lebar *proofmass* pada desain diaplikasikan pada desain 6, desain 1 dan desain 5. Ukuran lebar *proofmass* dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah $14\mu\text{m}$, $28\mu\text{m}$ dan $56\mu\text{m}$. Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.1.

Pada grafik 4.1, perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan hasil yang konstan. Hal ini disebabkan oleh penambahan lebar dari *proofmass* yang tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai perpindahan yang terjadi. Perubahan lebar dari *proofmass* hanya akan menyebabkan pertambahan nilai dari massa desain. Pada representasi persamaan sistem perpindahan desain, nilai massa bernilai kecil dibandingkan dengan nilai lain seperti nilai konstanta pegas sehingga penambahan dari nilai massa tersebut tidak akan begitu mempengaruhi nilai dari perpindahan yang terjadi.

Berbeda dengan hasil pada kalkulasi, hasil SUGAR menunjukkan pertambahan nilai dari perpindahan dengan bertambahnya nilai dari lebar *proofmass*. Hal ini disebabkan oleh representasi matriks desain pada SUGAR yang kurang sempurna. Hal ini terlihat ketika pergeseran dari posisi *finger* desain yang terjadi akibat penambahan lebar dari *proofmass*. Ketika posisi *finger*



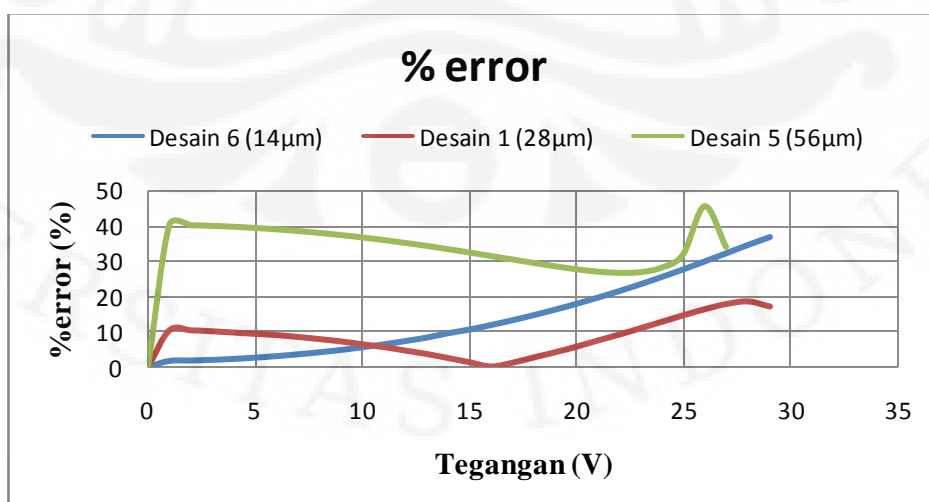
Grafik 4.1. Grafik perpindahan dari variasi lebar *proofmass*

pada desain tersebut berubah, nilai perpindahan yang harusnya tidak bergeser tersebut menurun seiring penambahan ukuran dari lebar *proofmass*.

Grafik perbandingan hasil simulasi dan perhitungan menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil simulasi dan perhitungan pada awalnya tidak begitu besar. Persentase kesalahan tersebut terus naik seiring bertambahnya ukuran dari lebar *proofmass*. Hal ini disebabkan oleh representasi matriks desain yang kurang sempurna pada SUGAR sehingga menyebabkan perubahan nilai perpindahan.

Selain persentase kesalahan mayor akibat representasi matriks desain, persentase kesalahan minor yang terjadi pada desain disebabkan oleh :

1. Penggunaan metode pendekatan Newton-Raphson sehingga hasil pengukuran kurang akurat;
2. *Mesh* pada simulator yang mempengaruhi banyaknya jumlah nodal yang dipakai dalam simulasi perpindahan sehingga mempengaruhi tingkat keakuratan dari simulasi;
3. Pembulatan hingga empat angka di belakang koma dari angka-angka yang dipakai dalam kalkulasi;
4. Pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi sehingga menyebabkan bentuk grafik persentase kesalahan terlihat naik pada beberapa tegangan awal, dan kemudian mengecil hingga kemudian naik lagi akibat dari pendekatan linear yang dipakai.



Grafik 4.2. Grafik persentase kesalahan dari variasi lebar *proofmass*

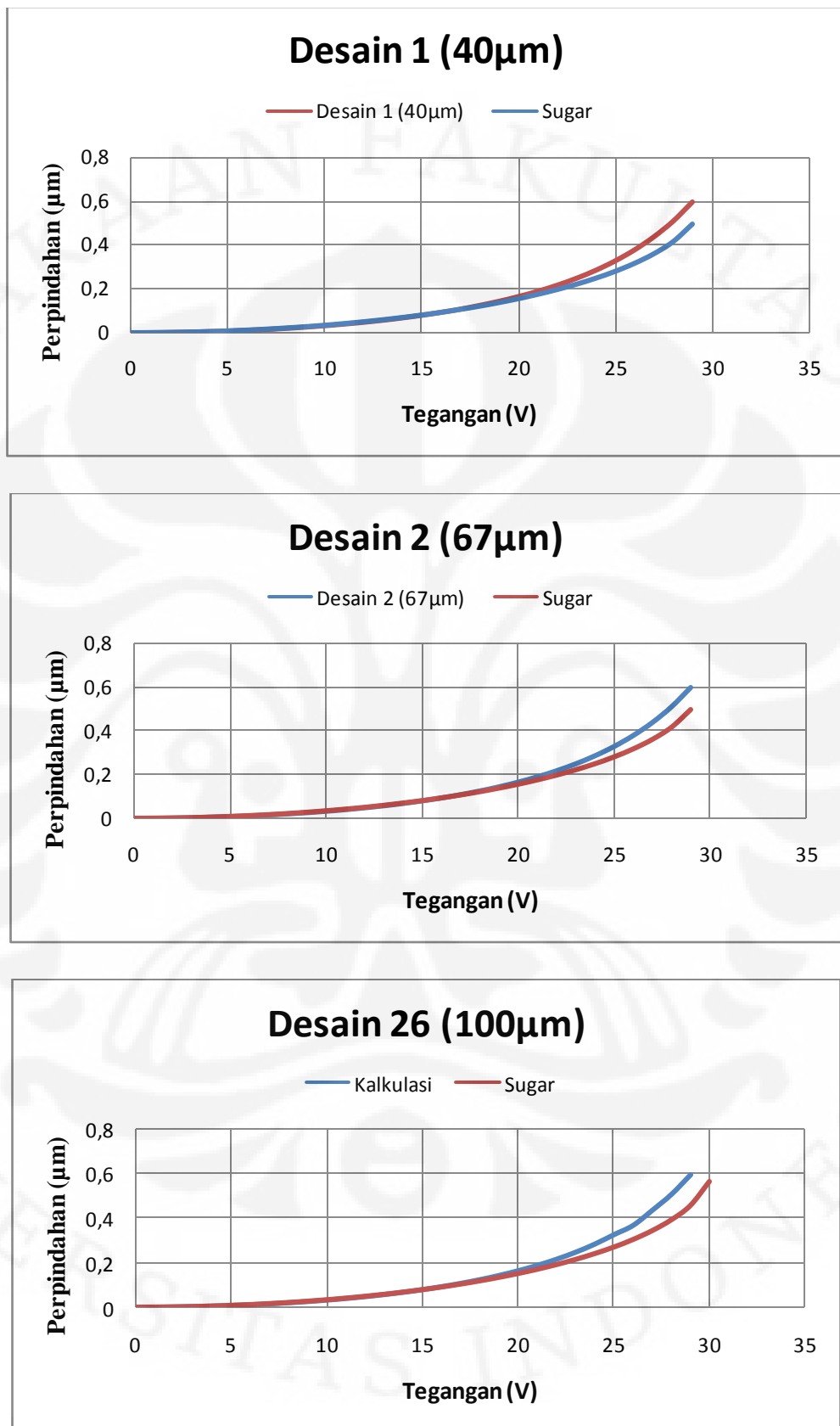
4.1.2. Variasi panjang *proofmass*

Variasi parameter panjang *proofmass* pada desain dilakukan pada desain 1, desain 2 dan desain 26. Ukuran panjang *proofmass* dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah 40 μm , 67 μm dan 100 μm . Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.3.

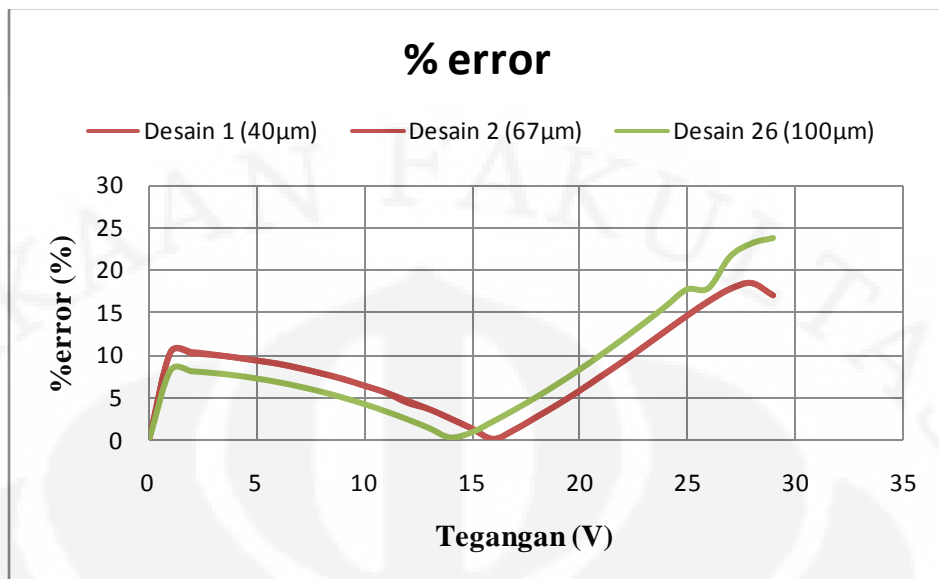
Pada grafik 4.3, perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan hasil yang konstan atau hampir tidak mengalami perubahan perpindahan akibat dari penambahan panjang *proofmass*. Hal ini disebabkan oleh penambahan panjang *proofmass* yang tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai perpindahan yang terjadi. Pada representasi persamaan sistem perpindahan desain, nilai massa bernilai kecil dibandingkan dengan nilai konstanta pegas sehingga perubahan dari nilai desain tidak akan begitu mempengaruhi nilai dari perpindahan yang terjadi. Kondisi yang sama juga terlihat pada grafik hasil simulasi SUGAR di mana pertambahan dari panjang *proofmass* tidak berpengaruh banyak terhadap nilai perpindahan yang terjadi.

Seperti pada grafik 4.3, grafik persentase kesalahan pada grafik 4.4 juga menunjukkan bahwa hasil simulasi dan kalkulasi tidak memiliki selisih yang besar. Persentase kesalahan yang terjadi tersebut disebabkan oleh :

1. Penggunaan metode pendekatan Newton-Raphson sehingga hasil pengukuran kurang akurat;
2. *Mesh* pada simulator yang mempengaruhi banyaknya jumlah nodal yang dipakai dalam simulasi perpindahan sehingga mempengaruhi tingkat keakuratan dari simulasi;
3. Pembulatan hingga empat angka di belakang koma dari angka-angka yang dipakai dalam kalkulasi;
4. Pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi sehingga menyebabkan bentuk grafik persentase kesalahan terlihat naik pada beberapa tegangan awal, dan kemudian mengecil hingga kemudian naik lagi akibat dari pendekatan linear yang dipakai.



Grafik 4.3. Grafik perpindahan dari variasi lebar *proofmass*



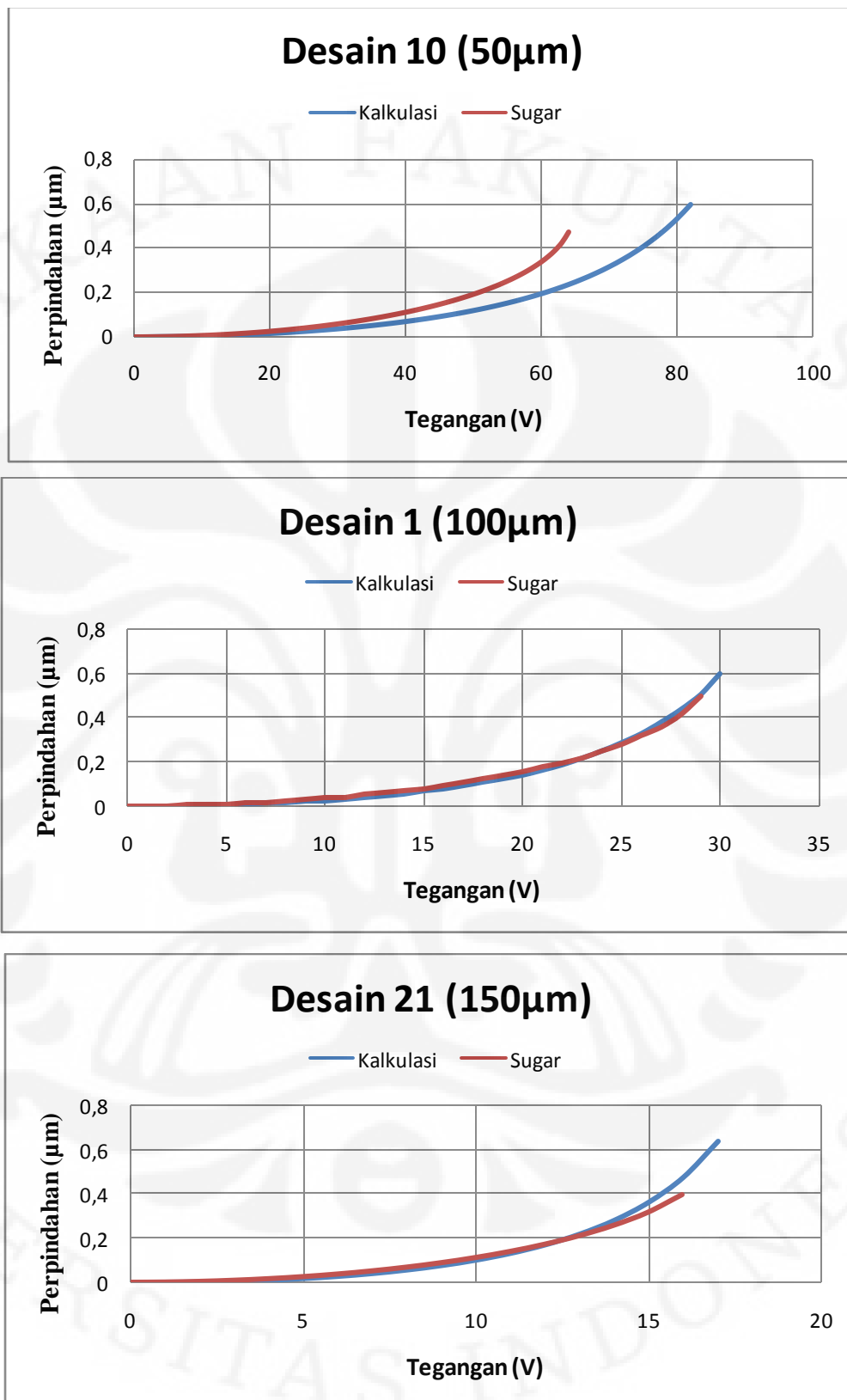
Grafik 4.4. Grafik persentase kesalahan dari variasi panjang *proofmass*

4.1.3. Variasi panjang *tether*

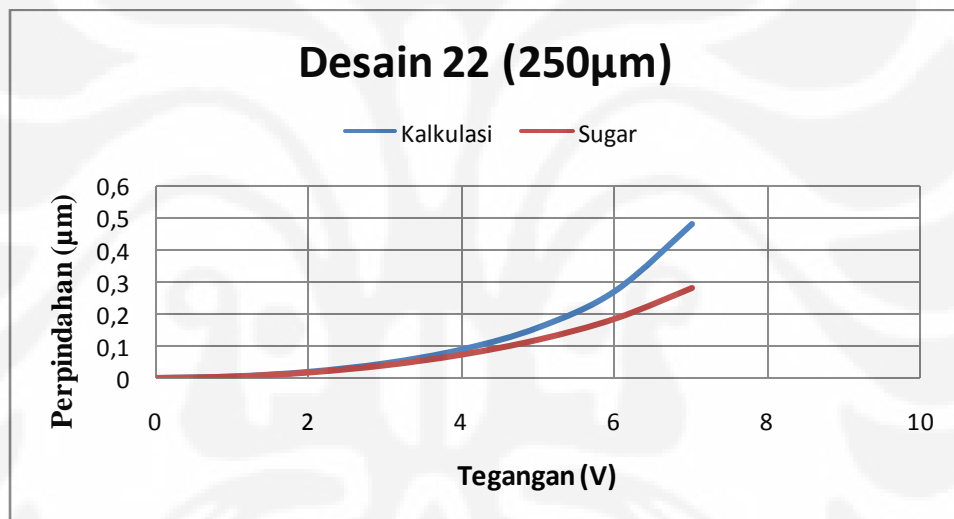
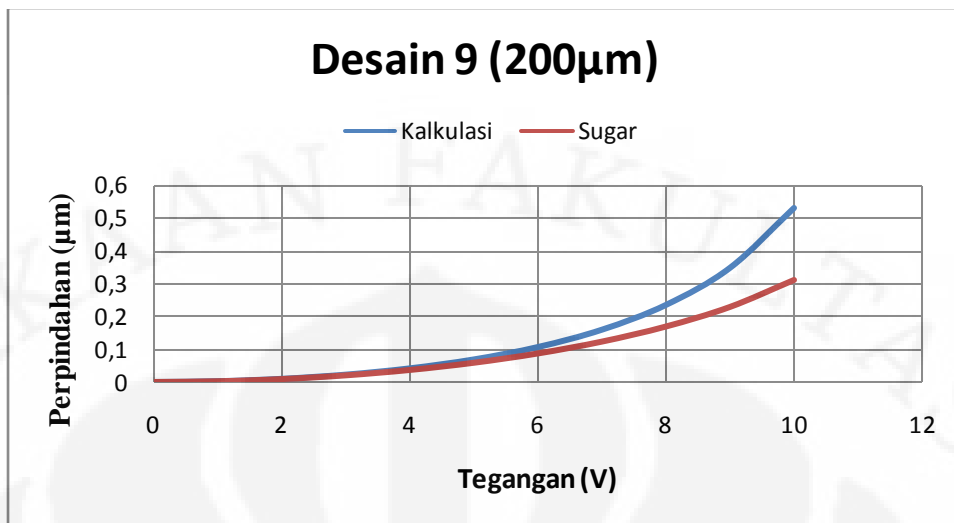
Variasi parameter panjang *tether* pada desain dilakukan pada desain 10, desain 1, desain 21, desain 9 dan desain 26. Ukuran panjang *tether* dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah 50µm, 100µm, 150 µm, 200 µm dan 250µm. Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.5 dan 4.6.

Pada grafik 4.5 dan 4.6, perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan peningkatan nilai dari perpindahan dengan bertambahnya ukuran dari panjang *tether*. Hal ini disebabkan oleh nilai dari konstanta pegas K_x yang akan menurun seiring bertambahnya ukuran dari panjang *tether*. Oleh karena itu, perpindahan terhadap sumbu x pada desain lebih mudah terjadi.

Kondisi yang sama juga terlihat pada grafik hasil simulasi perpindahan SUGAR. Grafik 4.5 dan 4.6 menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil dari simulasi dan perhitungan tidak begitu besar. Grafik persentase kesalahan pada grafik 4.7 juga menunjukkan kecenderungan yang sama, kecuali grafik desain ke-10 yang memiliki nilai tegangan *pull-in* yang lebih besar dari desain-desain lainnya. Perbedaan tersebut diakibatkan oleh pendekatan linear yang digunakan dalam kalkulasi sehingga gaya elektrostatis yang seharusnya naik secara eksponensial dianggap naik secara linear.



Grafik 4.5. Grafik perpindahan dari variasi panjang *tether* berukuran 50 μm , 100 μm dan 150 μm

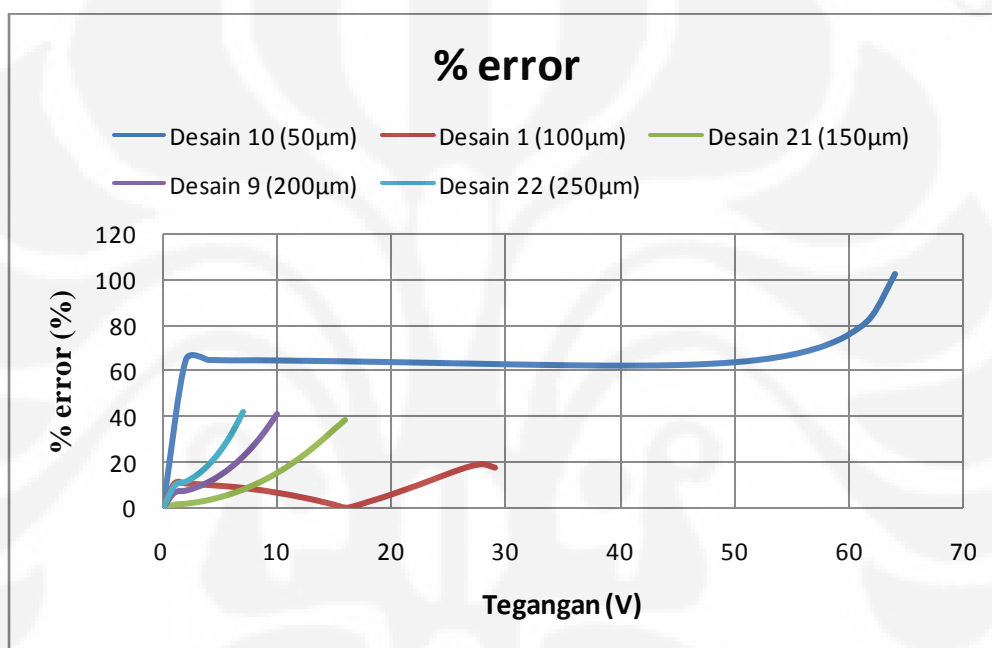


Grafik 4.6. Grafik perpindahan dari variasi panjang *tether* berukuran 200 μm dan 250 μm

Persentase kesalahan minor lain yang terjadi disebabkan oleh :

1. Penggunaan metode pendekatan Newton-Raphson sehingga hasil pengukuran kurang akurat
2. *Mesh* pada simulator yang mempengaruhi banyaknya jumlah nodal yang dipakai dalam simulasi perpindahan sehingga mempengaruhi tingkat keakuratan dari simulasi
3. Pembulatan hingga empat angka di belakang koma dari angka-angka yang dipakai dalam kalkulasi

4. Pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi sehingga menyebabkan bentuk grafik persentase kesalahan terlihat naik pada beberapa tegangan awal, dan kemudian mengecil hingga kemudian naik lagi akibat dari pendekatan linear yang dipakai seperti pada desain pertama. Terdapat pula grafik persentase kesalahan yang hanya naik secara eksponensial akibat dari perbedaan yang terjadi antara hasil kalkulasi pendekatan linear dengan hasil simulasi.



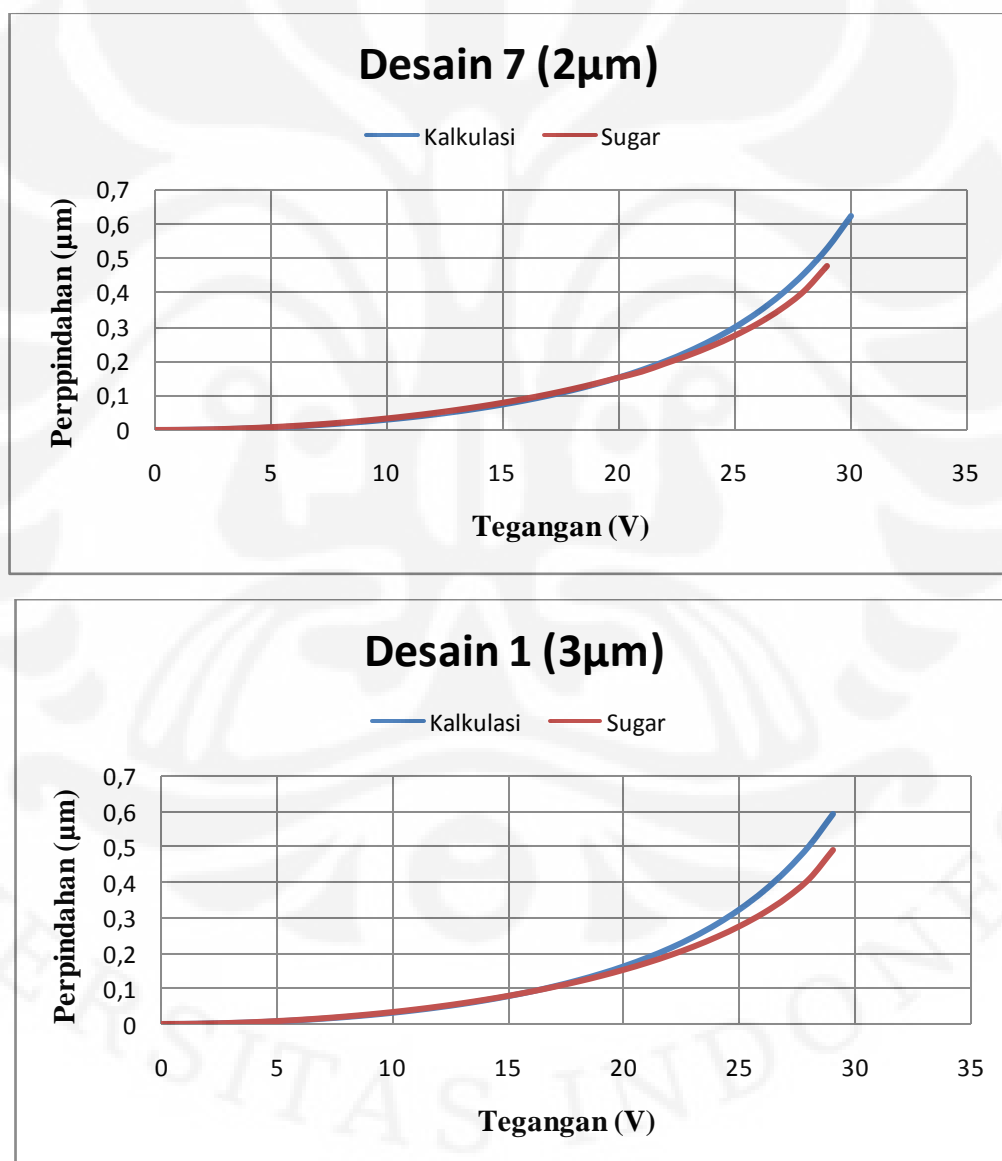
Grafik 4.7. Grafik persentase kesalahan dari variasi panjang *tether*

4.1.4 Variasi lebar *tether*

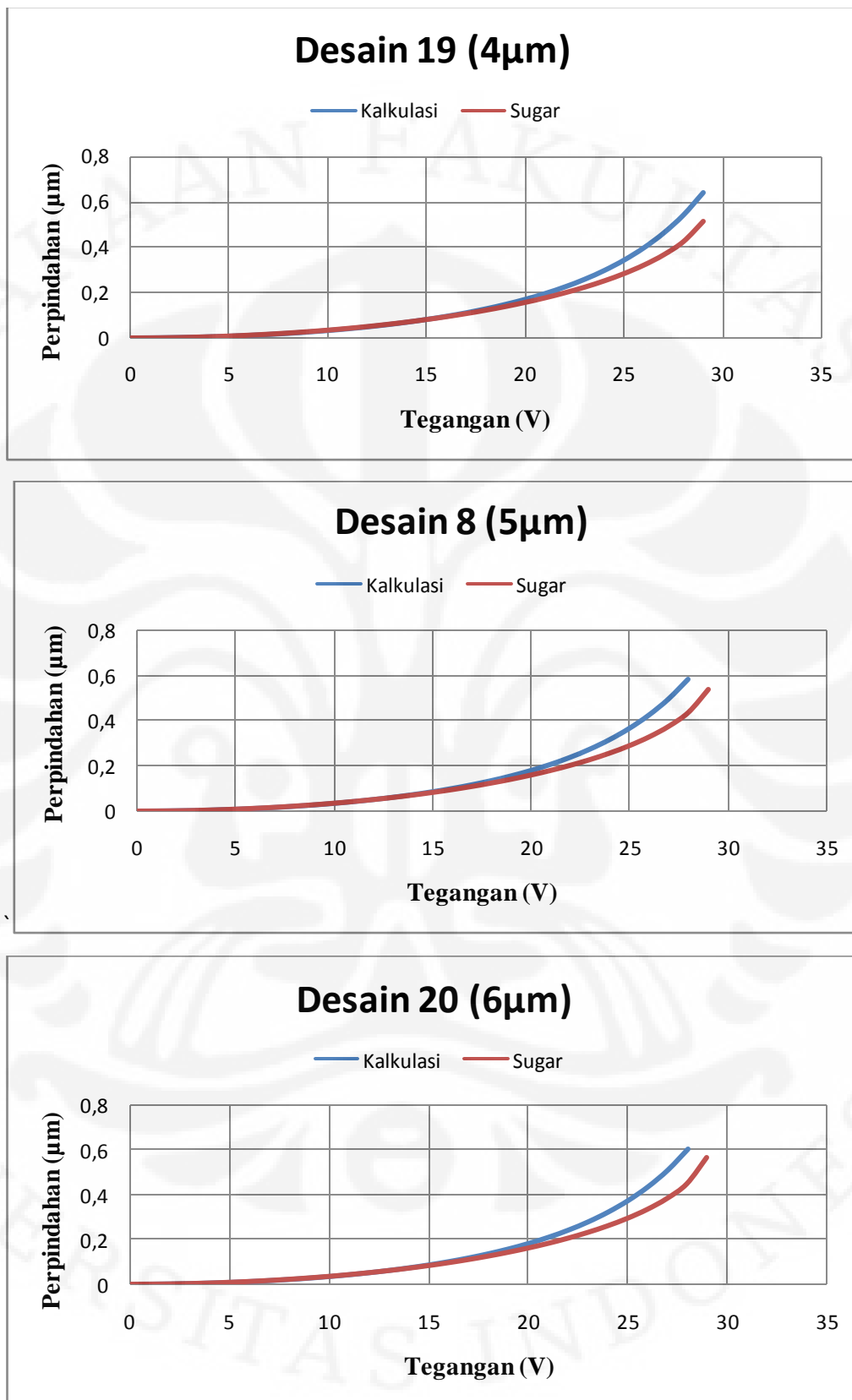
Variasi parameter lebar *tether* pada desain dilakukan pada desain 7, desain 1, desain 4, desain 8 dan desain 20. Ukuran lebar *tether* dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah 2µm, 3µm, 4µm, 5µm dan 6µm. Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.8 dan 4.9.

Perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan peningkatan nilai dari perpindahan dengan bertambahnya ukuran dari lebar *tether*. Hal ini disebabkan oleh penambahan ukuran lebar *tether* yang akan menyebabkan penurunan nilai dari konstanta pegas K_y , sedangkan nilai konstanta pegas K_x tidak banyak

terpengaruh oleh perubahan lebar dari *tether* ini. Oleh karena itu, perpindahan desain terhadap sumbu X tidak banyak mengalami perubahan walau terdapat sedikit penurunan nilai perpindahan terhadap sumbu X akibat dari penambahan lebar *tether* tersebut. Kondisi tersebut terlihat jelas pada grafik 4.8 dan 4.9 yang menggambarkan kondisi tersebut. Kedua grafik tersebut juga menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil simulasi dan perhitungan tidak begitu besar. Kondisi yang sama juga terlihat pada grafik 4.10 yang menunjukkan nilai persentase kesalahan yang terjadi.



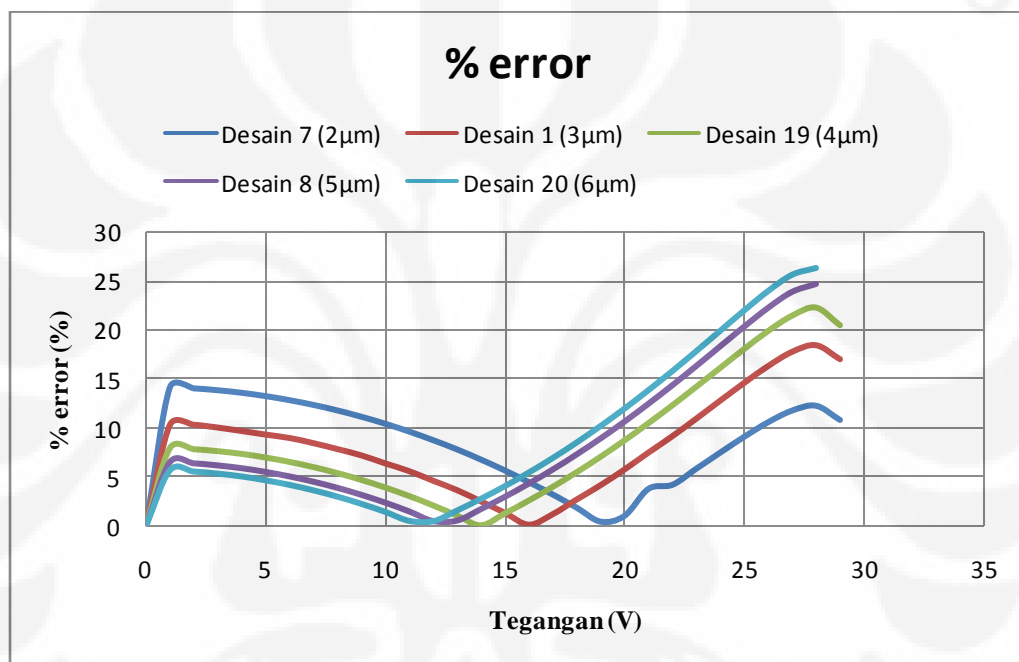
Grafik 4.8. Grafik perpindahan dari variasi lebar *tether* berukuran 2 μm dan 3 μm



Grafik 4.9. Grafik perpindahan dari variasi lebar *tether* berukuran $4\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ dan $6\mu\text{m}$

Persentase kesalahan yang terjadi tersebut disebabkan oleh :

1. Penggunaan metode pendekatan Newton-Raphson
2. *Mesh* pada simulator yang kurang akurat
3. Pembulatan hingga empat angka di belakang koma dari angka-angka yang dipakai dalam kalkulasi
4. Pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi sehingga grafik persentase error naik pada awal dan akhir.



Grafik 4.10. Grafik persentase kesalahan dari variasi lebar *tether*

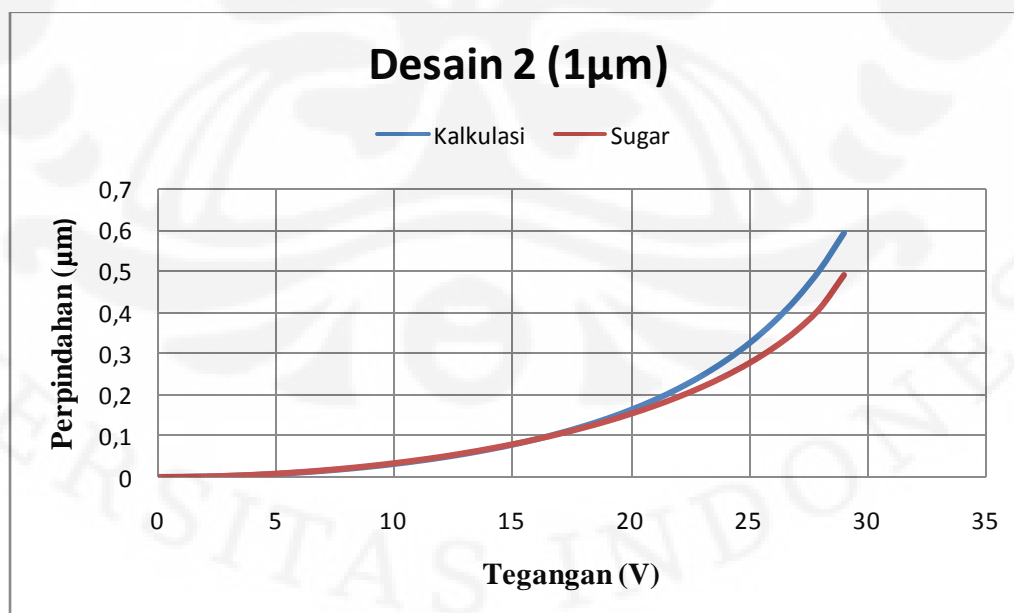
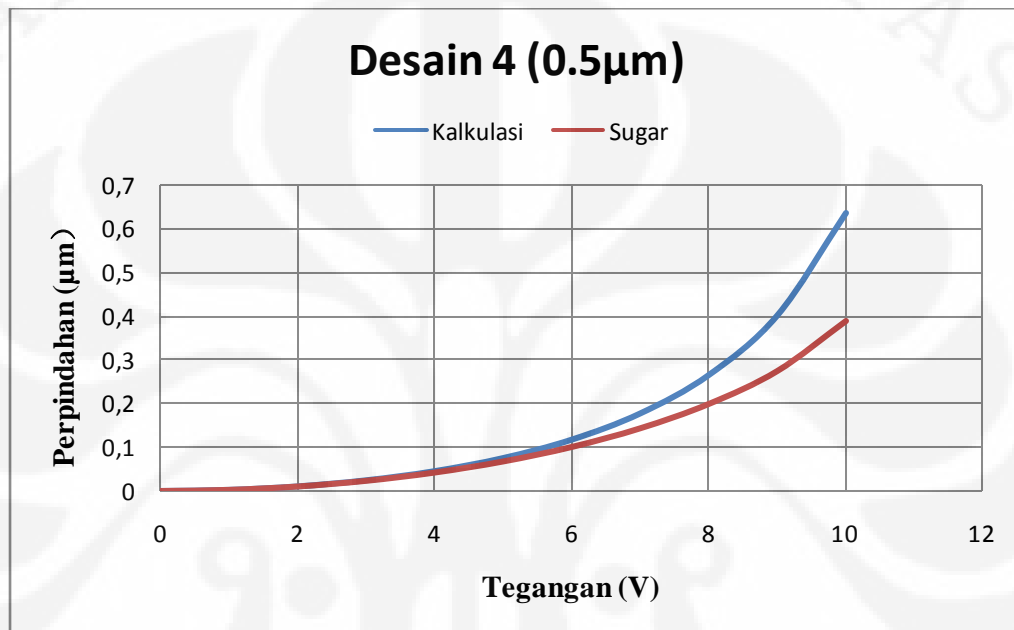
4.1.5. Variasi tebal *tether*

Variasi parameter tebal *tether* pada desain dilakukan pada desain 4, desain 2, desain 18, desain 3 dan desain 19. Ukuran tebal *tether* dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah $0.5\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}$, $1.5\ \mu\text{m}$, $2\ \mu\text{m}$ dan $2.5\ \mu\text{m}$. Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.11 dan 4.12.

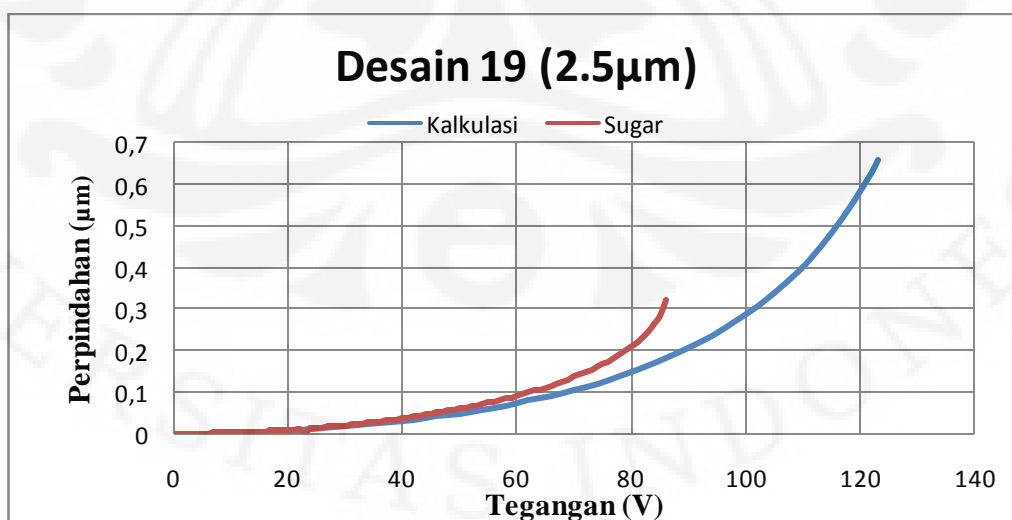
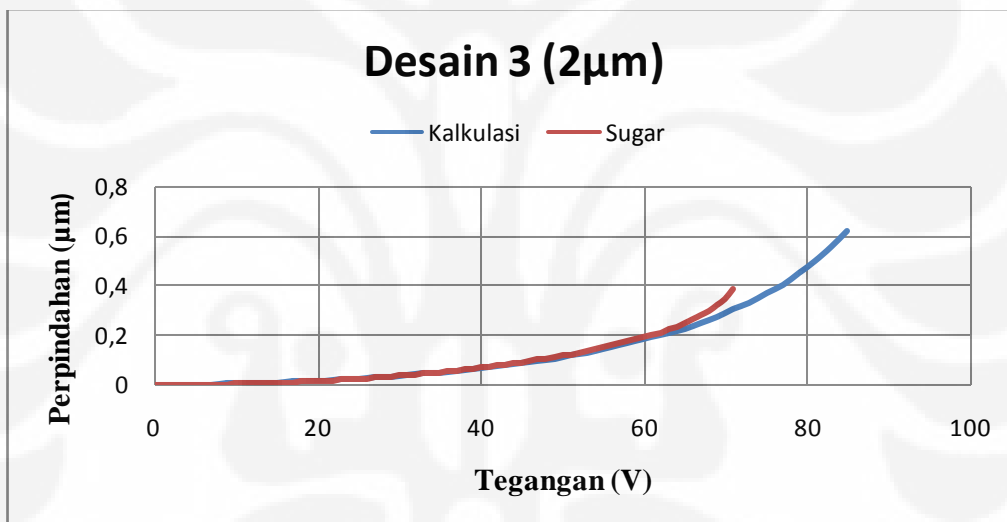
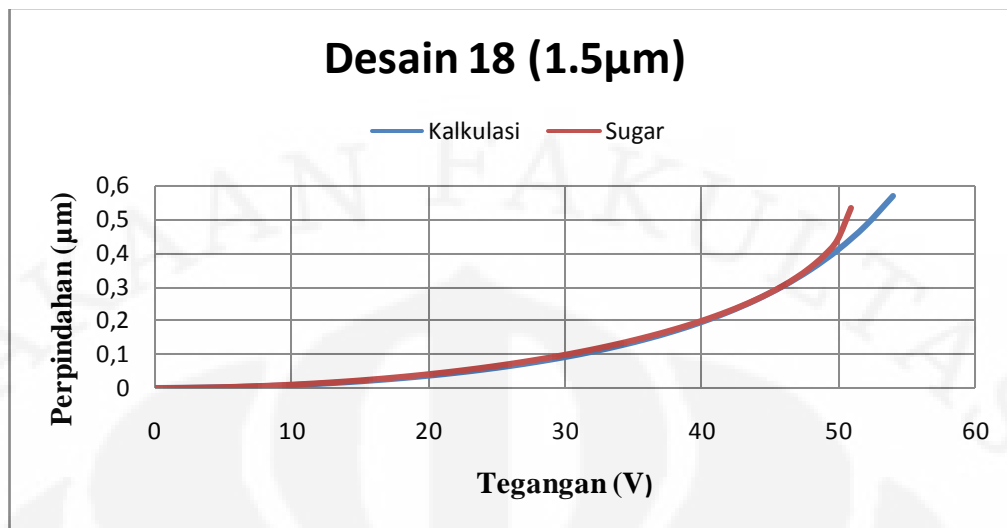
Perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan penurunan nilai dari perpindahan dengan bertambahnya ukuran dari tebal *tether*. Hal ini diakibatkan oleh penambahan tebal *tether* yang akan meningkatkan nilai konstanta pegas K_x dan K_y . Dengan demikian, perpindahan menjadi lebih sulit terjadi akibat dari

peningkatan nilai konstanta pegas tersebut. Kondisi serupa juga terlihat pada grafik hasil simulasi perpindahan SUGAR.

Grafik 4.11 dan 4.12 menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil simulasi dan perhitungan tidak begitu besar. Grafik persentase kesalahan pada grafik 4.13 juga menunjukkan hal yang sama.



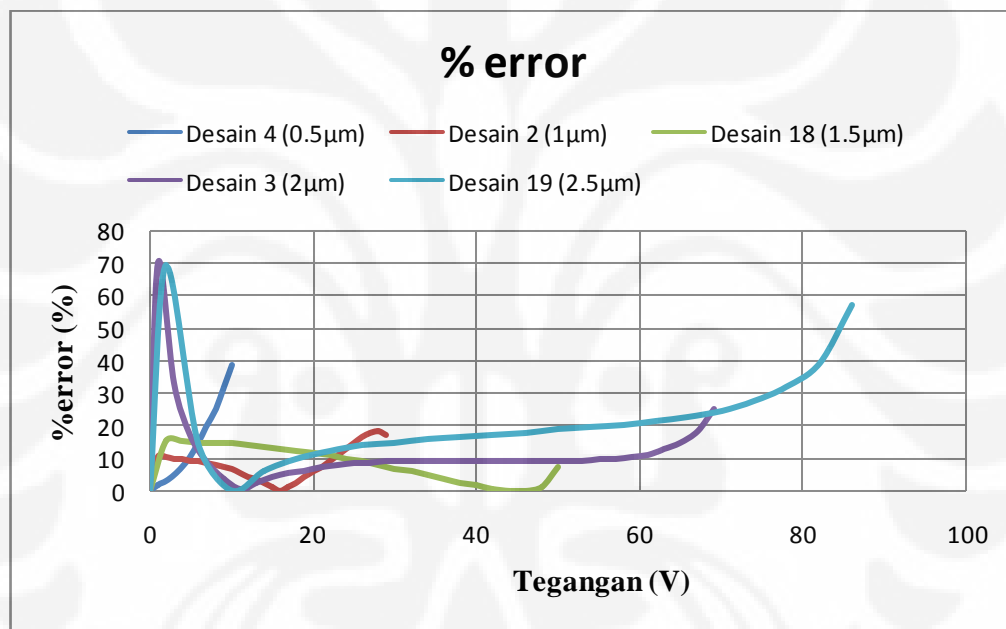
Grafik 4.11. Grafik perpindahan dari variasi tebal *tether* berukuran 0.5 μ m dan 1 μ m



Grafik 4.12. Grafik perpindahan dari variasi tebal *tether* berukuran 1.5 μm , 2 μm dan 2.5 μm

Persentase kesalahan yang terjadi disebabkan oleh :

1. Penggunaan metode pendekatan Newton-Raphson
2. *Mesh* yang digunakan pada simulator sehingga mempengaruhi tingkat keakuratan dari hasil simulasi
3. Pembulatan hingga empat angka di belakang koma dari angka-angka yang dipakai dalam kalkulasi
4. Pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi sehingga pada desain dengan nilai tegangan *pull-in* yang tinggi seperti pada desain 3 dan desain 19, grafik akan memiliki persentase kesalahan yang tinggi.

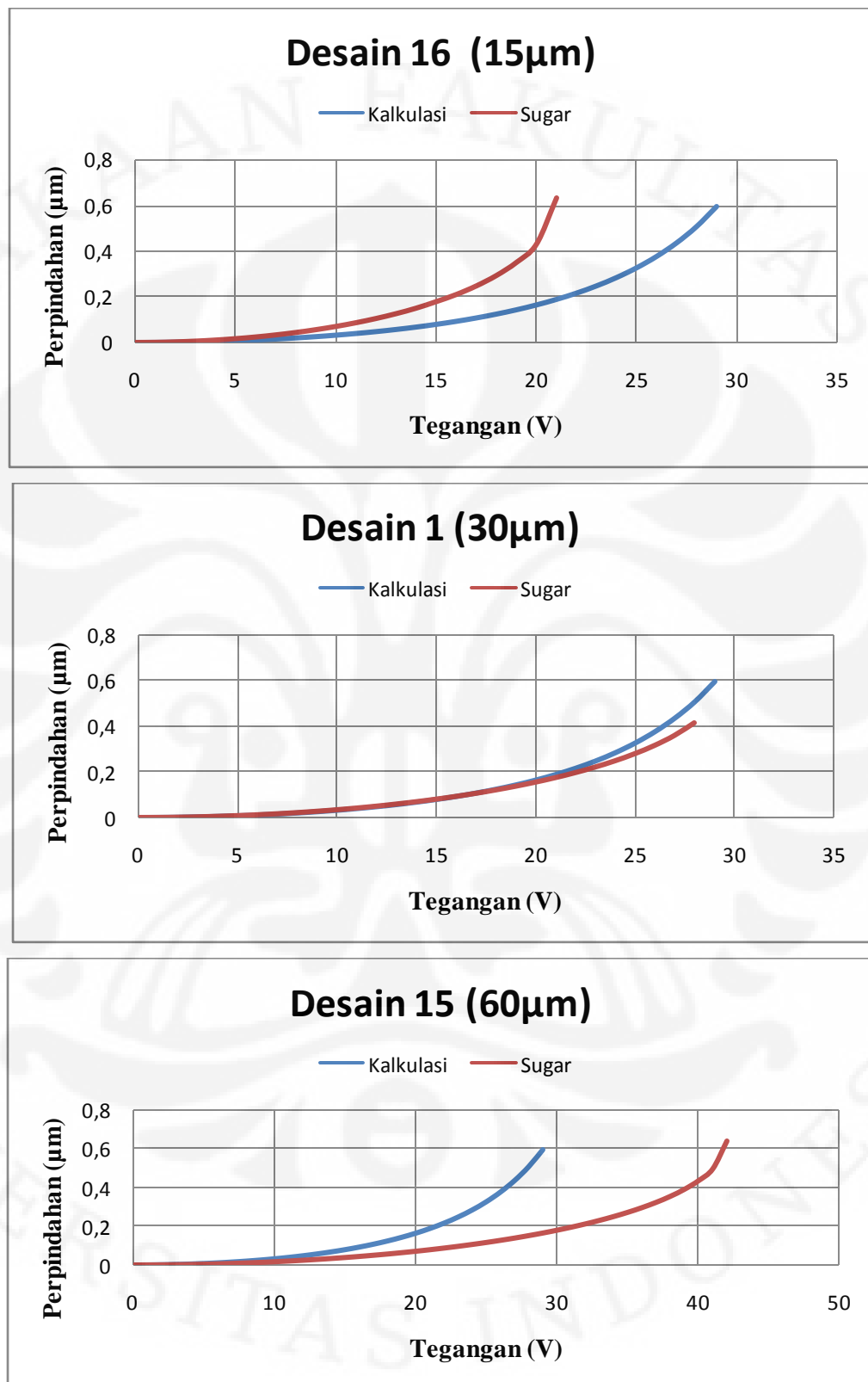


Grafik 4.13. Grafik persentase kesalahan dari variasi lebar *tether*

4.1.6. Variasi tebal desain

Variasi parameter tebal desain pada desain dilakukan pada desain 16, desain 1, dan desain 15. Ukuran tebal desain dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah 15µm, 30µm, dan 60µm. Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.14.

Perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan hasil yang konstan atau hampir tidak terjadi perubahan. Hal ini disebabkan perubahan tebal desain yang akan mempengaruhi nilai dari massa, koefisien *damping*, luas permukaan,

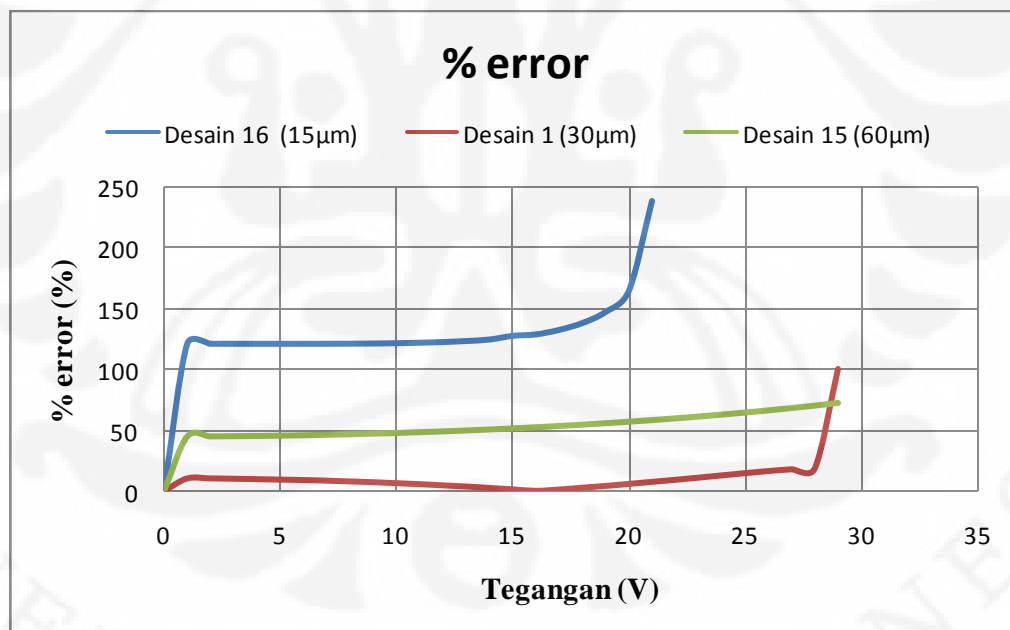


Grafik 4.14. Grafik perpindahan dari variasi tinggi desain

momen inersia, kapasitansi dan konstanta pegas dari desain. Akan tetapi, parameter-parameter tersebut saling mengkompensasi sehingga tidak terjadi banyak perubahan pada desain ketika diberi tegangan.

Berbeda dengan hasil pada kalkulasi, hasil SUGAR menunjukkan penurunan nilai dari perpindahan dengan bertambahnya nilai dari tebal desain. Hal ini disebabkan oleh faktor-faktor seperti :

1. Simulasi dengan metode pendekatan Newton-Raphson sehingga hasil yang didapatkan kurang akurat
2. Pengabaian beberapa parameter akibat dari simulasi dengan metode pendekatan Newton-Raphson
3. Pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi sehingga gaya elektrostatik yang eksponensial dianggap linear. Hal ini menyebabkan perbedaan yang lumayan besar dalam *slope* kemiringan grafik persentase kesalahan antara hasil kalkulasi dengan hasil simulasi



Grafik 4.15. Grafik persentase kesalahan dari variasi tinggi desain

Grafik perbandingan hasil simulasi dan perhitungan menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil simulasi dan perhitungan yang terjadi cukup besar. Hal ini terlihat jelas pada grafik 4.15 di mana persentase kesalahan bernilai

sangat tinggi. Persentase kesalahan yang terjadi disebabkan oleh faktor- faktor yang telah disebutkan sebelumnya. Persentase-persentase kesalahan minor juga terjadi. Persentase kesalahan minor tersebut umumnya disebabkan oleh *mesh* yang dipakai simulator kurang akurat dan pembulatan angka-angka yang dipakai dalam kalkulasi.

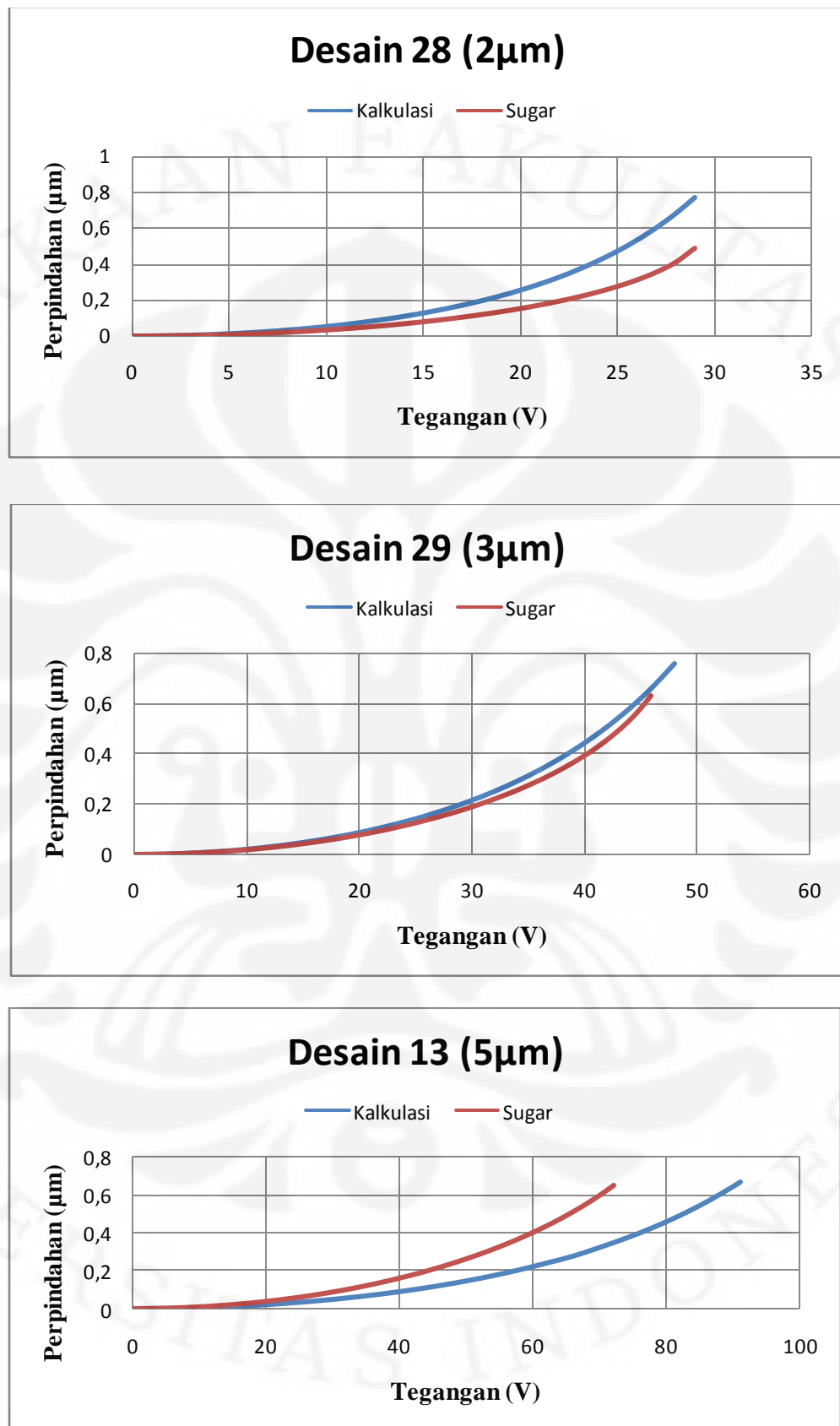
4.1.7. Variasi *gap* kecil

Variasi parameter *gap* kecil pada desain dilakukan pada desain 28, desain 29, dan desain 5. Ukuran *gap* kecil dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah $2\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, dan $5\mu\text{m}$. Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.16.

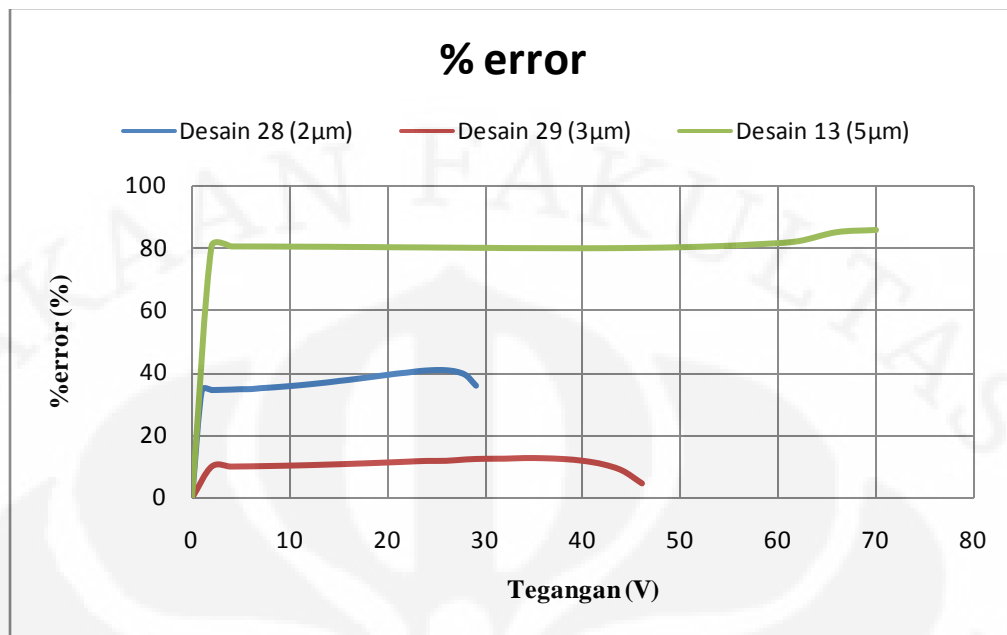
Perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan penurunan nilai dari perpindahan dengan bertambahnya ukuran dari *gap* kecil. Hal ini disebabkan oleh penambahan *gap* yang mengakibatkan peningkatan nilai tegangan *pull-in* serta penurunan nilai dari gaya elektrostatis yang terjadi. Oleh karena itu, dengan tegangan masukan yang sama nilai perpindahan yang terjadi pada *gap* yang bernilai lebih besar akan lebih kecil daripada desain yang memiliki ukuran *gap* lebih kecil. Kondisi yang sama juga terjadi pada hasil simulasi SUGAR.

Grafik persentase kesalahan 4.17 menunjukkan persentase kesalahan yang cukup tinggi, terutama pada desain dengan nilai tegangan *pull-in* yang besar. Hal ini disebabkan oleh pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi sehingga perpindahan hasil kalkulasi dan simulasi memiliki perbedaan *slope* yang cukup besar. Selain itu, persentase kesalahan minor lain yang terjadi disebabkan oleh:

1. Penggunaan metode pendekatan Newton-Raphson sehingga mempengaruhi tingkat keakuratan dari hasil simulasi.
2. *Mesh* pada simulator yang mempengaruhi keakuratan hasil dari simulasi perpindahan
3. Pembulatan hingga empat angka di belakang koma dari angka-angka yang dipakai dalam kalkulasi



Grafik 4.16. Grafik perpindahan dari variasi *gap* kecil

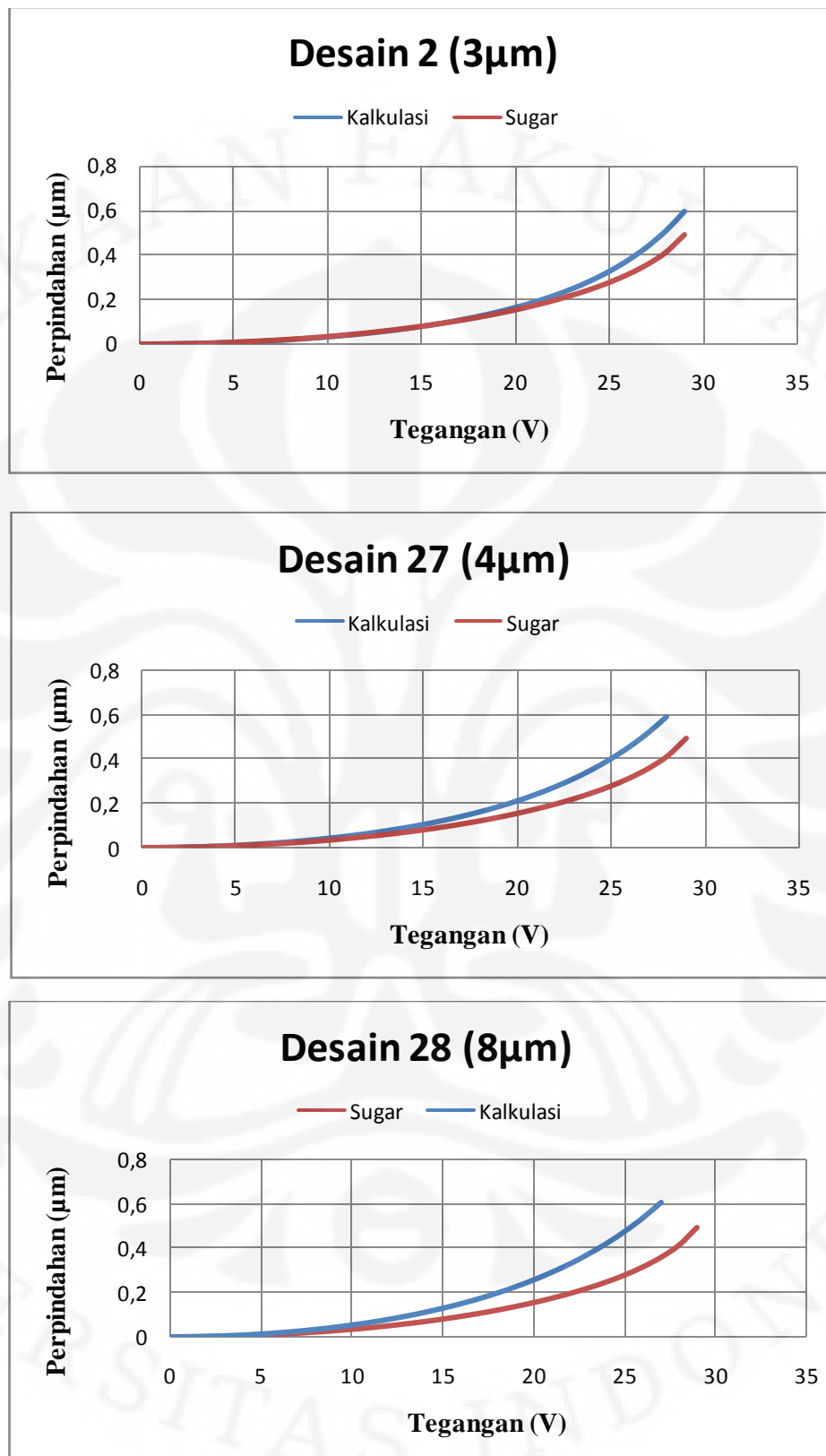


Grafik 4.17. Grafik persentase kesalahan dari variasi *gap* kecil

4.1.8. Variasi *gap* besar

Variasi parameter *gap* besar pada desain dilakukan pada desain 2, desain 27, dan desain 28. Ukuran *gap* besar dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah 3µm, 4µm, dan 8µm. Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.18.

Perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan kenaikan nilai dari perpindahan dengan bertambahnya ukuran dari *gap* besar. Hal ini disebabkan oleh pengaruh gaya elektrostatis pada *gap* besar yang akan mereduksi gaya elektrostatis yang terjadi pada *gap* kecil sehingga gaya elektrostatis resultan yang terjadi menjadi lebih kecil dengan penambahan ukuran dari *gap* besar ini. Namun, hasil pada SUGAR menunjukkan kecenderungan yang berbeda di mana pemvariasian dari nilai *gap* besar tidak mempengaruhi nilai perpindahan yang terjadi. Kondisi ini disebabkan oleh pendekatan metode Newton-Raphson yang kurang akurat dalam mensimulasi efek dari perubahan *gap* besar yang berukuran lebih besar. Hal ini terlihat pada grafik persentase kesalahan 4.19 yang menunjukkan persentase kesalahan yang cukup bagus pada desain 2, sedangkan pada kedua desain lain yang memiliki *gap* besar yang lebih besar persentase kesalahannya bernilai cukup besar.



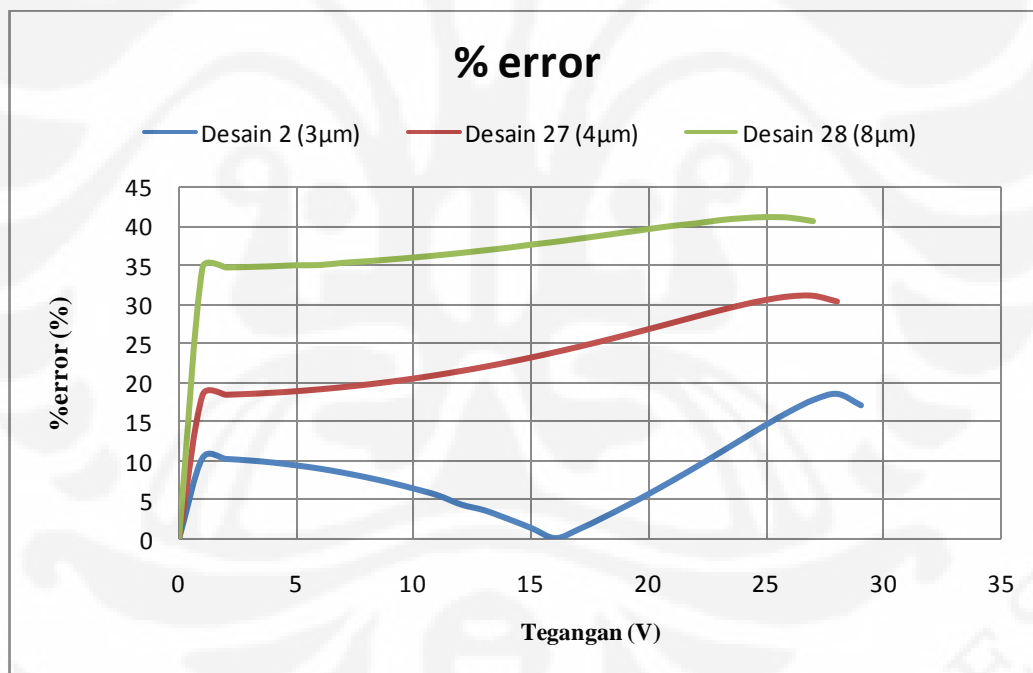
Grafik 4.18. Grafik perpindahan dari variasi *gap* besar

Persentase kesalahan-kesalahan yang terjadi tersebut disebabkan oleh :

1. Penggunaan metode pendekatan Newton-Raphson yang kurang akurat dalam mensimulasi perpindahan dari variasi parameter *gap besar*
2. Pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi sehingga terjadi kenaikan persentase yang cukup banyak pada tegangan-tegangan awal. Pada grafik desain 2, grafik yang ditunjukkan cukup bagus di mana hasil menunjukkan bahwa hasil kalkulasi mirip dengan hasil simulasi.

Kesalahan-kesalahan minor lainnya dalam persentase kesalahan disebabkan oleh :

1. *Mesh* pada simulator yang kurang akurat
2. Pembulatan angka-angka yang dipakai dalam simulasi



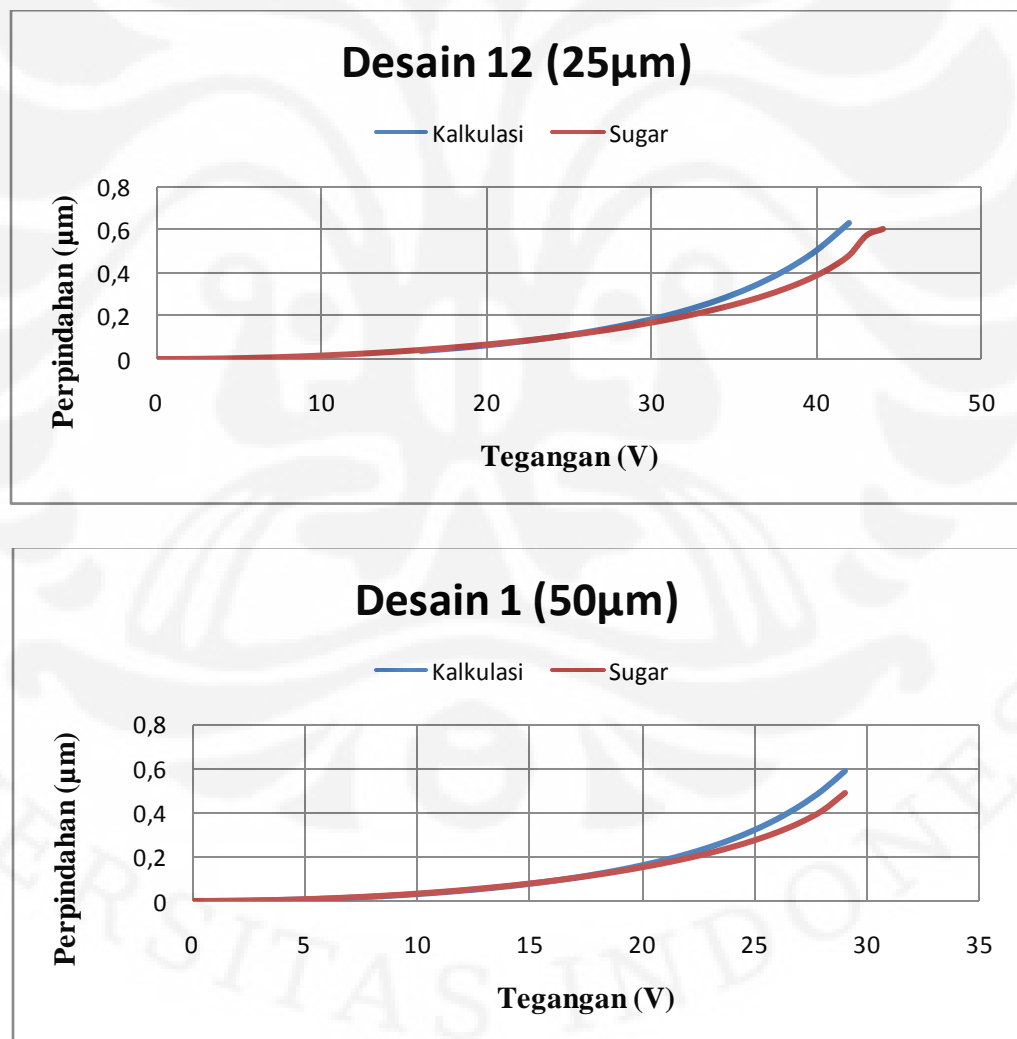
Grafik 4.19. Grafik persentase kesalahan dari variasi *gap* besar

4.1.9. Variasi panjang *finger*

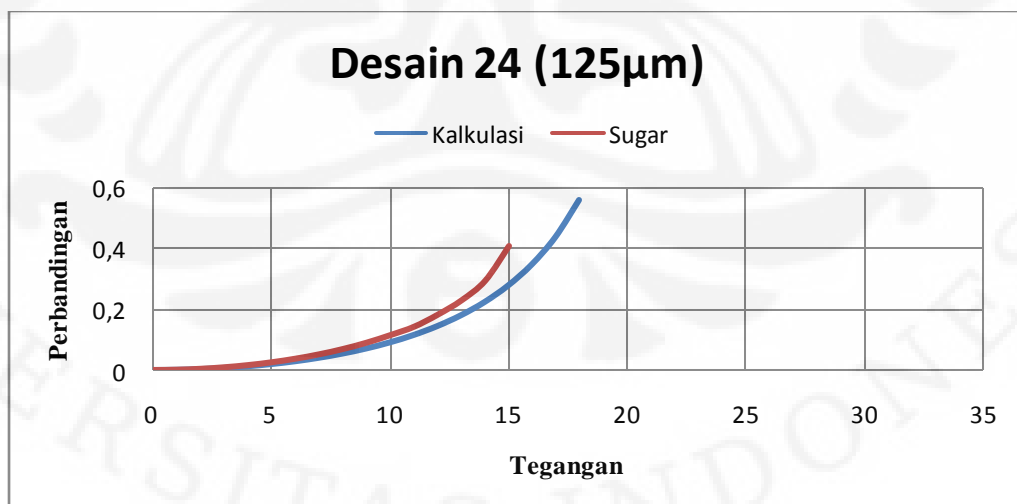
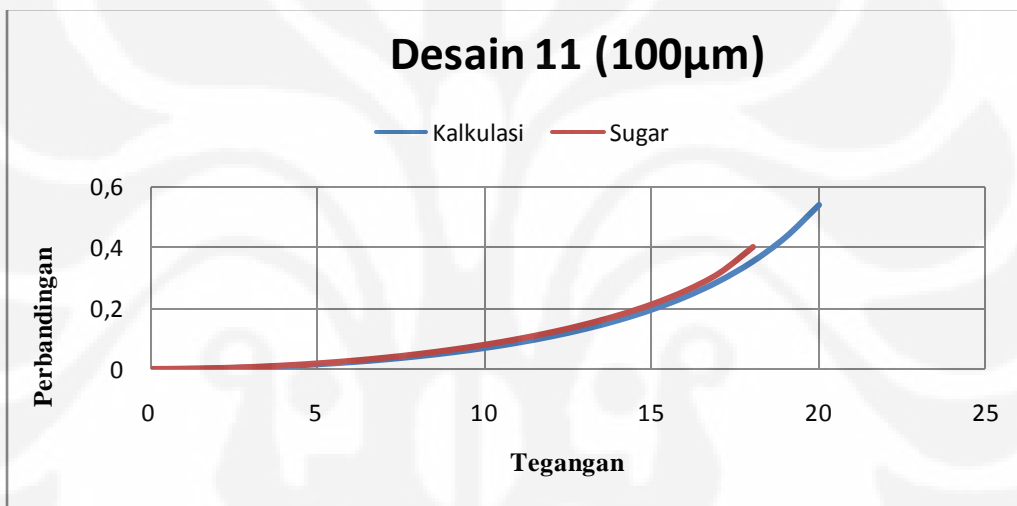
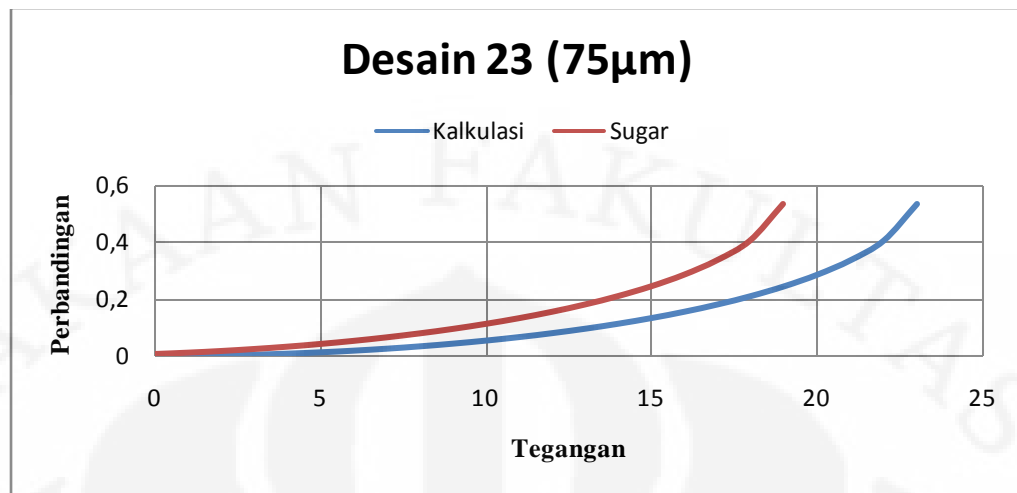
Variasi parameter panjang *finger* pada desain dilakukan pada desain 12, desain 1, desain 23, desain 11, dan desain 24. Ukuran panjang *finger* dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah 25 µm, 50 µm, 75 µm, 100 µm dan 125 µm.

Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.20 dan 4.21.

Perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan pertambahan nilai dari perpindahan dengan bertambahnya ukuran dari panjang *finger*. Hal ini disebabkan oleh pertambahan ukuran dari panjang *finger* yang akan mempengaruhi nilai dari koefisien *damping*, luas penampang, dan kapasitansi dari desain. Pertambahan ukuran dari panjang *finger* akan meningkatkan nilai dari luas penampang sehingga perpindahan yang terjadi akan bertambah. Grafik hasil simulasi SUGAR juga menunjukkan kecenderungan yang sama di mana penambahan dari panjang *finger* akan menurunkan nilai perpindahan.



Grafik 4.20. Grafik perpindahan dari variasi panjang *finger* berukuran 25 μm dan 50 μm



Grafik 4.21. Grafik perpindahan dari variasi panjang *finger* berukuran 75 μ m, 100 μ m dan 125 μ m

Grafik 4.20 dan 4.21 menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil simulasi dan perhitungan tidak begitu besar. Grafik persentase kesalahan juga menunjukkan hal yang sama. Persentase kesalahan yang terjadi disebabkan oleh:

1. Penggunaan metode pendekatan Newton-Raphson
2. *Mesh* pada simulator yang mempengaruhi keakuratan hasil
3. Pembulatan hingga empat angka di belakang koma dari angka-angka yang dipakai dalam kalkulasi
4. Pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi

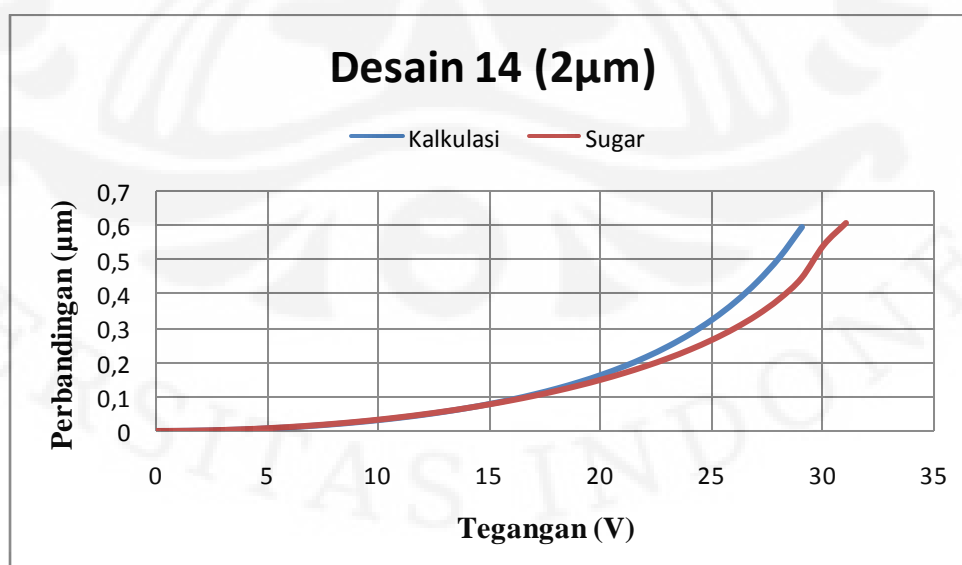
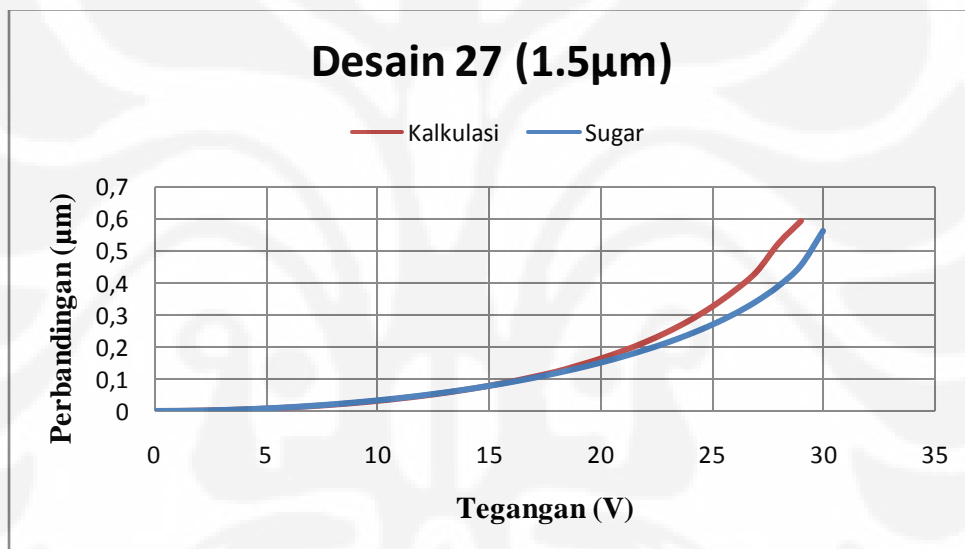
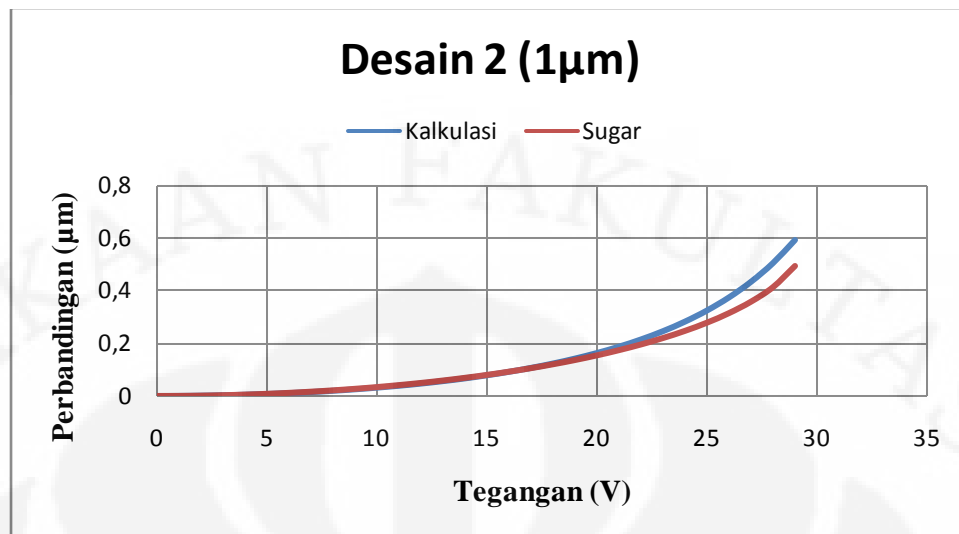


Grafik 4.22. Grafik persentase kesalahan dari variasi panjang *finger*

4.1.10 Variasi tebal *finger*

Variasi parameter tebal *finger* pada desain dilakukan pada desain 2, desain 27, dan desain 14. Ukuran tebal *finger* dari desain-desain tersebut secara berurutan adalah 3 μ m, 4 μ m, dan 8 μ m. Perbedaan antara hasil perpindahan simulasi dengan kalkulasi dapat terlihat pada grafik-grafik pada grafik 4.23.

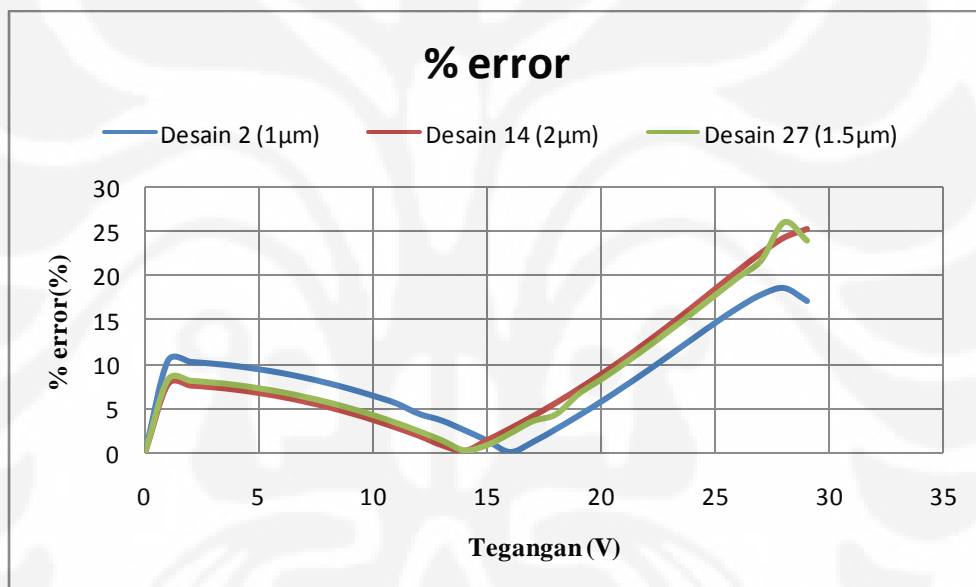
Perpindahan hasil dari kalkulasi menunjukkan perubahan tebal *finger* tidak mempengaruhi nilai perpindahan. Hal itu dikarenakan pergerakan desain yang searah sumbu x sehingga perubahan dari tebal *finger* tidak terlalu mempe-



Grafik 4.23. Grafik perpindahan dari variasi tebal *finger*

ngaruhi nilai perpindahan dari desain. Begitu pula dalam simulasi SUGAR. Grafik 4.24 juga menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil simulasi dan perhitungan tidak begitu besar. Persentase kesalahan yang terjadi disebabkan oleh :

1. Penggunaan metode pendekatan Newton-Raphson
2. *Mesh* pada simulator yang mempengaruhi keakuratan hasil
3. Pembulatan hingga empat angka di belakang koma dari angka-angka yang dipakai dalam kalkulasi
4. Pendekatan linear yang dipakai dalam kalkulasi



Grafik 4.24. Grafik persentase kesalahan dari variasi tebal *finger*

BAB 5 KESIMPULAN

- Dari hasil analisis percobaan, dapat disimpulkan bahwa simulator SUGAR merupakan program simulator yang cukup mampu dalam mensimulasi desain MEMS akselerometer kapasitif yang berfungsi sebagai aktuator. Kondisi pencapaian nilai tegangan *pull-in* pada saat perpindahan bernilai sepertiga dari *gap* antar elektroda tersimulasi dengan baik dalam SUGAR.
- Simulator SUGAR telah memenuhi kriteria-kriteria sebuah simulator yang baik yakni memiliki tingkat keakuratan yang cukup baik, kecepatan desain yang cepat, mempertimbangkan efek-efek fisika seperti nilai kapasitansi dan elektrosatik, serta memperlihatkan efek-efek fisik yang cukup merepresentasikan perpindahan yang terjadi pada desain walaupun desain hasil simulasi yang ditampilkan kurang terdeskripsikan dengan detail.
- Akan tetapi, simulator SUGAR mengalami kendala dalam kriteria fleksibilitas. Simulator SUGAR mengalami kesulitan dalam mensimulasi perpindahan desain dengan variasi parameter ketebalan desain, *gap* besar dan lebar *proofmass*. Berdasarkan analisa, penulis menyimpulkan bahwa kendala tersebut muncul karena faktor :
 1. Representasi matriks SUGAR yang kurang sempurna
 2. Pemakaian metode pendekatan Newton Raphson dalam simulasi yang dilakukan oleh SUGAR
- Penulis menyimpulkan bahwa metode analisa keakuratan simulasi melalui kalkulasi dengan pendekatan linear tidak dapat digunakan sebagai acuan yang akurat, karena faktor-faktor yang diabaikan dapat mempengaruhi *slope* perubahan dari grafik perpindahan sehingga perbandingan antara hasil simulasi dan kalkulasi sulit untuk dilakukan. Oleh karena itu, penulis menyarankan penggunaan kalkulasi yang memperhitungkan elemen berorde lebih dari satu dalam pelaplasan deret Taylor yang dipakai untuk mewakili persamaan gaya elektrostatik.

DAFTAR REFERENSI

- [1] David Bindel, Jason Clark, Ningning Zhou, "SUGAR 3.0: A MEMS Simulation Program (User's Guide)", p. 01. 2002.
- [2] D.Mohana Geeta dan M.Madheswaran, "Performance Analysis and Optimization of Lumped of Electrostatic Actuators for Optical MEMS Switches", International Journal of Computer Science and Information Security. Vol 7, No. 1. Kumaraguru college of Technology dan Muthayammal Engineering College : Department of Electronics and Communication Engineering. India. 2010.
- [3] G.K. Fedder, S. Santhanam, M.L. Reed, S.C. Eagle, D.F. Guillou, M.Lu, L.R. Carley, "Laminated high-aspect-ratio microstructures in a conventional CMOS process", Sensors and Actuators A, vol.A57, no.2, p.103-110.
- [4] Agus Santoso Tamsir, "Differential Capacitive MEMS Accelerometer with Non-crossing Sensing Element for Airbag Application." Bangi : Universiti Kebangsaan Malaysia. 2005.
- [5] Matej Andrejašič, "MEMS accelerometers." University of Ljubljana : Department of physics. 2008.
- [6] Jinghong Chen, Member, IEEE, Wendelin Weingartner, Alexi Azarov, dan Randy C. Giles, "Tilt-Angle Stabilization of Electro statically Actuated Micromechanical Mirrors Beyond the Pull-In Point". Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 13, No. 6. Desember 2004.
- [7] H. Baltes, O. Brand, A. Hierlemann, D. Lange, and C. Hagleitner, "CMOS MEMS - present and future", The Fifteenth IEEE International Conference on MicroElectro Mechanical Systems. Las Vegas, NV, pp. 459-466. 2002.
- [8] Marcel W. Pruessner, Kuldeep Amarnath, Madhumita Datta, Daniel P. Kelly, S. Kanakaraju, Ping-Tong Ho, Reza Ghodssi, murid-murid, dan anggota IEEE, "InP-Based Optical Waveguide MEMS Switches With Evanescent Coupling Mechanism" Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 14, No. 5. Oktober 2005.
- [9] Sazzadur Chowdhury, M. Ahmadi, W. C. Miller "A Comparison of Pull-in Voltage Calculation Methods for MEMS-Based Electrostatic Actuator

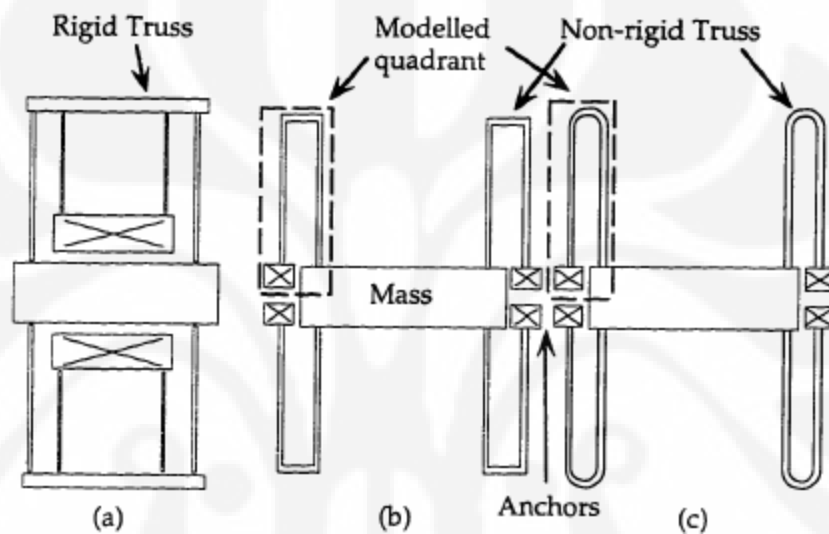
- Design”1st International Conference on Sensing Technology. Palmerston North, New Zealand. 21-23 November 2005.
- [10] Chang Liu, ”foundations of MEMS”, Illinois ECE series. Pearson International edition 2006.
- [11] J. M. Bustillo, R. T. Howe, dan R. S. Muller, "Surface micromachining for microelectromechanical systems", Proceedings of the IEEE, vol. 86, pp.1552-1574. 1998.
- [12] F. Chollet, H. Liu, “A (not so) short introduction to MEMS”, Singapore : Nanyang Technological University. 2008.
- [13] S. E. Lyshevski, “Mems and Nems: systems, devices and structures.” CRC Press LLC, USA. 2002.
- [14] Selvakumar, Arjun, “A Multifunctional Silicon Micromachining Technology for High Performance Microsensors and MicroActuators.” The University of Michigan. 2007.
- [15] Gary Keith Fedder, “Simulation of Microelectromechanical System”, pp.71. Berkeley : University of California. 1994.
- [16] Jason Vaughn Clark, Ningning Zhou, dan K. S. J. Pister, “MEMS Simulation Using Sugar v0.5.” Berkeley Sensor and Actuator Center. Berkeley : University of California. 1998.
- [17] Matlab, “Matlab High-Performance Numeric Computation and Visualization Software Reference Guide.” The Math Works Inc., 24 Prime Park Way Natick, Mass. 1992.
- [18] J.V. Clark, N. Zhou, Dbonder, L. Schenato, W. Wu, J. Demmel, dan K. S. J. Pister, “3D MEMS Simulation Modeling Using Modified Nodal Analysis”. Berkeley Sensor and Actuator Center. Berkeley : University of California.
- [19] <http://mepow.wordpress.com/2009/06/24/tips-menyusun-metodologi-metode-penelitian-skripsi-tesis/> , “Tips Menyusun Metodologi / Metode Penelitian Skripsi / Tesis”. Pukul 16.00 WIB, 20 Mei 2010.
- [20] Ningning Zhou, Jason Vaughn Clark dan K. S. J. Pister, “Nodal Analysis for MEMS design using SUGAR v0.5.” Berkeley.

- [21] Qi Jing, "Modeling and Simulation for Design of Suspended MEMS."
Pittsburg, Pennsylvania : Carnegie Mellon University. May 21, 2003.



Lampiran A Konstanta pegas

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bentuk-bentuk dari pegas yang dipakai dibuat bergantung pada pengaplikasiannya. Aplikasi MEMS akselerometer kapasitif dengan pergerakan lateral memerlukan bentuk pegas yang lebih seimbang dan cocok yakni *folded beams* seperti pada gambar A1 (b) dan (c).



Gambar A1. (a) Desain FB konvensional dengan penopang yang kaku, (b) desain dengan penopang tidak kaku yang lurus dan (c) melingkar [14]

A.1. Desain dengan penopang lurus

Salah satu dari bentuk dari desain *folded beams* adalah bentuk desain dengan penopang yang lurus seperti pada gambar A1 (b). Bentuk diagram dari salah satu dari empat *beam* dapat diperhatikan pada gambar A2.

Dari diagram gambar A2, persamaan yang didapat adalah :

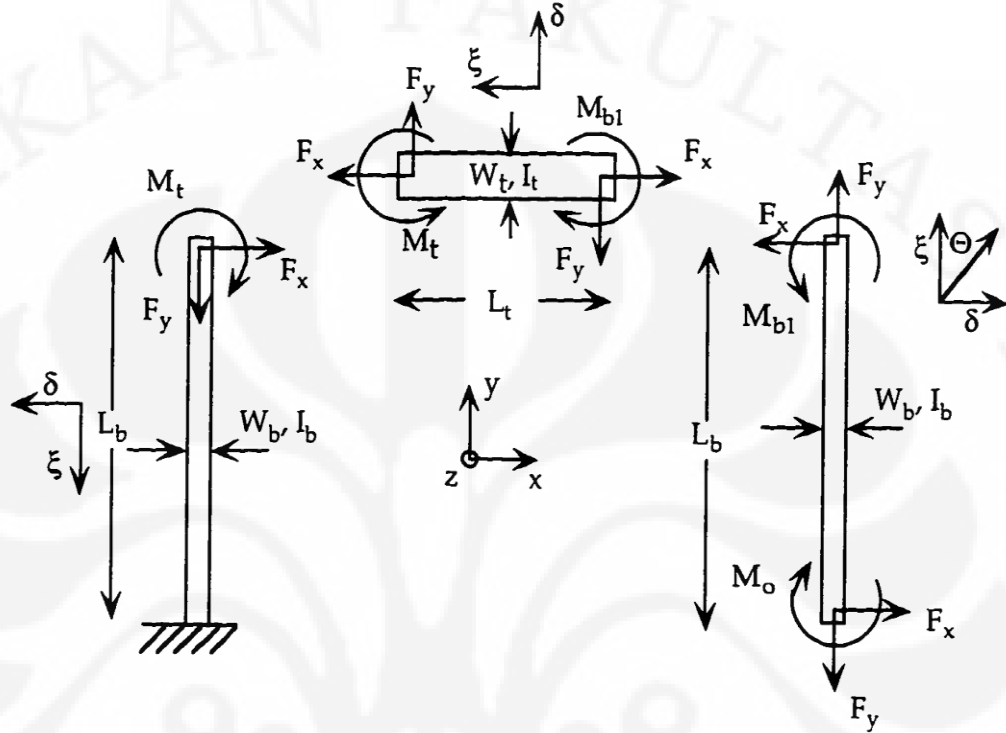
$$M_{b1} = M_o - F_x \xi \quad (A1)$$

$$M_t = M_o - F_x L_b - F_y \xi \quad (A2)$$

$$M_{b2} = M_o - F_x L_b - F_y L_t + F_x \xi \quad (A3)$$

Di mana M_{b1} , M_t dan M_{b2} adalah momen-momen pada *beam* 1 dan 2 serta pada penopang; M_o merupakan momen pada mass ketika terjadi defleksi; F_x dan F_y

merupakan masukan gaya pada beam; L_b dan L_t merupakan panjang *beam* serta penopangnya [14].



Gambar A2. Diagram salah satu dari empat *beam* [14]

Untuk menemukan nilai dari K_x , pertama-tama perlu untuk mengetahui persamaan dari M_o dan F_y dalam F_x . Kemudian, M_o dan F_y dieliminasi dengan memakai persamaan yang didapati pada saat kondisi *boundary*, yakni $\Theta = 0$ dan $\delta_v = 0$. Dengan memakai kondisi rotasi nol [14]:

$$\Theta = \frac{dU}{dM_o} = 0 \quad (\text{A4})$$

pada teorema Castigliano kita dapatkan [14]:

$$M_o = F_x L_b \frac{(L_b + \alpha L_t)}{(2L_b + \alpha L_t)} + F_y \frac{L_t}{2} \quad (\text{A5})$$

di mana $\alpha = I_b/I_t$. Kemudian, dengan memakai persamaan kondisi *boundary* yang lain ($\delta y = 0$) [14]:

$$\delta_y = \frac{dU}{dF_y} = 0 \quad (\text{A6})$$

kita dapatkan [14]:

$$F_y = 0 \quad (A7)$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan (A6) kita dapatkan [14]:

$$\delta_x = F_x \frac{L_b^3 (L_b + 2\alpha L_t)}{3EI (2L_b + \alpha L_t)} \quad (A8)$$

dan untuk sebuah *folded beam* dengan 4 bagian, total konstanta pegas K_x adalah :

$$K_x = 4K_{x,4} = 4 \frac{F_x}{\delta_x} \quad (A9)$$

atau :

$$k_x = \frac{12EI (2+\alpha\beta)}{L_b^3 (1+2\alpha\beta)} \quad (A10)$$

di mana $\beta = L_t/L_b$

Perhatikan pula nilai β sangat kecil akibat dari panjang tiang penopang yang sangat kecil dibandingkan dengan panjang dari *beam*. Konstanta pegas K_y juga didapatkan dengan cara yang sama. Kondisi *boundary* yang dipakai adalah persamaan (A6).

Karena M_0 telah didapatkan, hanya perlu ditemukan nilai F_x dalam F_y . Dengan cara yang sama, yaitu memakai persamaan (A6) kita dapatkan persamaan :

$$F_x = F_y \frac{3\beta (1+\alpha\beta)(2+\alpha\beta)}{2 (1+2\alpha\beta)} \quad (A11)$$

Kemudian dengan menyelesaikan persamaan :

$$\delta_y = \frac{dU}{dF_y} \quad (A12)$$

Didapatkan :

$$\delta_y = F_y \frac{L_t^3}{2EI_b} \left[\frac{1}{\beta} + \frac{\alpha}{6} \right] \quad (A13)$$

Dengan memakai bentuk persamaan yang sama dengan persamaan (A9) didapatkan persamaan K_y :

$$k_y = \frac{48EI_b}{L_t^3 \left(\frac{6}{\beta} + \alpha \right)} \quad (A14)$$

Lampiran B

Tegangan Pull-in

Kondisi *pull-in* merupakan kondisi di mana kedua plat elektrostatis paralel saling menyentuh. Kondisi ini terjadi jika tegangan yang diberikan pada plat elektrostatis tersebut melebihi dari nilai tegangan *pull-in*.

Pada desain aktuator sederhana, di antara kedua plat elektrostatis yang berhadapan akan terdapat kapasitansi. Nilai kapasitansi C , diantara kedua plat paralel tersebut dapat ditulis dalam persamaan :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (B1)$$

Dimana Q merupakan jumlah muatan dan V adalah nilai potensial elektrostatis.

Energi elektrik yang tersimpan dalam sebuah kapasitor dapat ditulis dalam persamaan :

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (B2)$$

Sesuai dengan Hukum Gauss, besar dari medan listrik E dapat ditulis dalam persamaan :

$$E = \frac{Q}{\epsilon A} \quad (B3)$$

Besar nilai dari tegangan adalah nilai medan listrik dikali dengan jarak diantara kedua plat paralel, d [2].

Dari persamaan-persamaan sebelumnya, persamaan kapasitansi pada plat kapasitor paralel dapat disederhanakan menjadi persamaan :

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{E \cdot d} = \frac{Q}{\frac{Q}{\epsilon A} d} = \frac{\epsilon A}{d} \quad (B4)$$

Kapasitor dapat digunakan sebagai sebuah aktuator untuk menghasilkan gaya atau perpindahan. Akibat dari perbedaan potensial yang diberikan di antara

kedua plat paralel tersebut, sebuah gaya tarik elektrostatis muncul. Besar dari gaya ini sama dengan gradien nilai energi elektrik yang tersimpan V_s terhadap variabel dimensional. Besar nilai dari gaya tersebut adalah :

$$F = \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{\partial C}{\partial x} \right| V^2 \quad (\text{B5})$$

di mana x merupakan variabel dimensional [2].

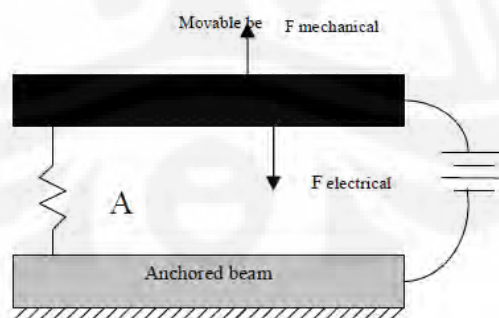
Jika plat tersebut bergerak, *gap* di antara kedua plat tersebut akan berubah dan besar dari gaya yang diberikan dapat kita tuliskan seperti persamaan berikut :

$$F = \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{d^2} V^2 = \frac{1}{2} \frac{C V^2}{d} \quad (\text{B6})$$

di mana dimensi normal berubah dari x menjadi d [2].

Plat yang menggantung akan tertarik menuju plat di bawah akibat dari resultan gaya elektrostatis tersebut. Plat menggantung bergerak menuju plat bawah hingga terjadi sebuah keseimbangan di antara kedua plat tersebut. Plat menggantung akan bersentuhan dengan plat bawah ketika diberikan gaya elektrostatis maksimum [2].

Kapasitansi dari divais dapat digunakan untuk mengkararakteristik respon elektromekanikal dari sebuah divais [2].



Gambar B1. Model elektromekanikal

Sebuah aktuator elektrostatis dapat dimodelkan sebagai sebuah kapasitor variabel yang menggantung oleh pegas-pegas yang elastis. Sebuah

aspek desain yang penting dari aktuator jenis ini adalah penentuan jumlah perpindahan static akibat pemberian sebuah nilai tegangan bias seperti pada gambar B1. *Beam* bagian atas ditopang oleh sebuah pegas mekanik dengan konstanta pegas K_m . Gaya gravitasi dapat diabaikan karena masa dari *beam* tersebut sangat kecil [2].

Ketika sebuah tegangan diberikan, gaya elektrostatik $F_{electric}$ muncul. Besar dari $F_{electric}$ tersebut dapat dituliskan dalam persamaan :

$$F_{electric} = \frac{1}{2} \frac{cV^2}{d} \quad (B7)$$

Gaya ini cenderung untuk mengurangi *gap* dan menciptakan perpindahan dan gaya restorasi mekanik [2]. Dalam keadaan seimbang, gaya elektrostatik dapat kita tuliskan dalam persamaan :

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_{electric} \quad (B8)$$

Keadaan seimbang ini dapat kita dapatkan dalam keadaan $\frac{d^2x}{dt^2}$ dan $\frac{dx}{dt}$ bernilai 0. Dengan demikian, besar dari gaya restorasi mekanik yang bekerja dapat dirumuskan :

$$F_{mechanical} = -K_m x \quad (B9)$$

Gradien kerenggangan pegas pada gaya elektrik didefinisikan sebagai konstanta pegas elektrik yang dapat dirumuskan dalam persamaan [2]:

$$K_e = \left| \frac{\partial F_{electric}}{\partial d} \right| = \left| - \left(\frac{cV^2}{d^2} \right) \right| = \frac{cV^2}{d^2} \quad (B10)$$

Gaya elektrostatik pada saat seimbang adalah ketika *beam* diberikan tegangan bias sehingga persamaan gaya elektrostatik akan bernilai [2]:

$$F_{electric} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A V^2}{(d-x)^2} \quad (B11)$$

Berdasarkan rumus kesetimbangan di mana nilai dari gaya mekanik akan bernilai sama dengan gaya elektrostatis pada perpindahan x , dengan mengubah sedikit persamaan (B9), perpindahan dapat dituliskan dalam persamaan [2]:

$$-x = \frac{F_{mechanical}}{K_m} = \frac{F_{electric}}{K_m} = \frac{c(x)V^2}{2(d-x)K_m} \quad (B12)$$

Pada tegangan bias tertentu, gaya restorasi mekanik dan elektrostatis akan saling menyeimbangkan. Dengan demikian, besar nilai dari konstanta pegas gaya elektrostatis akan bernilai sama dengan konstanta pada nilai gaya mekanik. Tegangan yang menyebabkan kejadian demikian disebut dengan tegangan *pull-in* „ V_{pi} ”. Jika tegangan yang diberikan melebihi dari nilai tegangan *pull-in*, kondisi keseimbangan ini akan berubah sehingga nilai dari gaya elektrostatis akan meningkat terus secara tidak proporsional terhadap nilai gaya mekanik yang hanya meningkat secara linear. Kedua elektroda yang saling berhadapan tersebut akan saling tarik menarik dan terjadi kontak. Keadaan ini disebut dengan kondisi *pull-in* atau *snaps-in* [2].

Berdasarkan persamaan (B12), nilai dari tegangan *pull-in* dapat kita rumuskan seperti [2]:

$$V^2 = -\frac{2K_m x(x-d)^2}{\epsilon A} = -\frac{2K_m x(d-x)}{c} \quad (B13)$$

Gradien dari kedua gaya tersebut pada saat kesetimbangan adalah sama dan dapat dituliskan [2] :

$$|K_e| = |K_m| \quad (B14)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (B10) dan (B13), kita akan dapatkan persamaan [2]:

$$K_e = \frac{cV^2}{(d-x)^2} = -\frac{2K_m x}{(d-x)} \quad (\text{B15})$$

Solusi dari x pada persamaan (B15) dapat diperoleh dengan $x = -d/3$.

Dari solusi persamaan (B15), dapat disimpulkan bahwa perpindahan relatif pada plat paralel akan terjadi sejauh sepertiga dari jarak antara kedua plat tersebut ketika diberi tegangan *pull-in*. Dengan demikian, dengan mensubstitusikan solusi persamaan (B15) pada persamaan (B13) tegangan *pull-in* pada aktuator dapat dituliskan dalam persamaan [2]:

$$v_{pi} = \frac{2d}{3} \sqrt{\frac{K_m d}{1.5\varepsilon A}} \quad (\text{B16})$$

Lampiran C

Perpindahan

Perpindahan pada sebuah aktuator akan terjadi apabila desain tersebut diberikan sumber tegangan. Pemodelan dari sistem tersebut dapat dirumuskan :

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_{electric} \quad (C1)$$

di mana :
 M = massa dari *proofmass*
 b = koefisien *damping*
 k = konstanta pegas
 F = gaya elektrostatis
 x = perpindahan

Gaya elektrostatis yang terjadi antar *finger-finger* pada sebuah desain MEMS akselerator kapasitif dapat dituliskan dalam persamaan :

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 AV^2 \left[\frac{1}{(d_1-x)^2} - \frac{1}{(d_2+x)^2} \right] \quad (C2)$$

di mana :
 F = gaya elektrostatis
 ϵ_0 = nilai permitivitas
 A = luas penampang paralel
 V = tegangan
 d_1 = gap kecil
 d_2 = gap besar
 x = perpindahan

Dengan mensubstitusikan persamaan (C2) pada (C1), model persamaan dari sistem dapat dirumuskan menjadi :

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = \frac{1}{2} \varepsilon_0 AV^2 \left[\frac{1}{(d_1-x)^2} - \frac{1}{(d_2+x)^2} \right] \quad (C3)$$

Dengan menggunakan deret binomial Taylor, persamaan (C2) dapat dituliskan menjadi :

$$F = \frac{1}{2} \varepsilon_0 AV^2 \left[\frac{1}{d_1^2} \left(1 + 2 \frac{x}{d_1} + 3 \left(\frac{x}{d_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{x}{d_1} \right)^3 + \dots \right) - \frac{1}{d_2^2} \left(1 - 2 \frac{x}{d_2} + 3 \left(\frac{x}{d_2} \right)^2 - 4 \frac{x^3}{d_2^3} + \dots \right) \right] \quad (C4)$$

Nilai perpindahan maksimal yang terjadi pada sebuah desain sebelum mencapai kondisi *pull-in* akan bernilai sebesar nilai gap dibagi dengan tiga. Dengan demikian, nilai dari x/d_1 dan x/d_2 setelah dikuadrat maupun dipangkat dengan angka yang lebih besar akan memiliki nilai yang sangat kecil. Oleh karena itu, nilai-nilai tersebut dapat diabaikan sehingga persamaan (C4) dapat dituliskan kembali menjadi :

$$F = \frac{1}{2} \varepsilon_0 AV^2 \left[\frac{1}{d_1^2} \left(1 + 2 \frac{x}{d_1} \right) - \frac{1}{d_2^2} \left(1 - 2 \frac{x}{d_2} \right) \right] \quad (C5)$$

Dengan pemisalan nilai :

$$k_1 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 AV^2}{d_1^3} \quad (C6)$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 AV^2}{d_2^3} \quad (C7)$$

Persamaan (C6) dan (C7) dapat disubstitusikan pada persamaan (C5) menjadi :

$$F = k_1 (d_1 + 2x) - k_2 (d_2 - 2x) \quad (C8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (C8) pada persamaan (C3), model persamaan sistem dapat diubah menjadi :

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = k_1(d_1 + 2x) - k_2(d_2 - 2x) \quad (C9)$$

atau

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + (k - k_1 + k_2)x = k_1 d_1 - k_2 d_2 \quad (c10)$$

Dengan metode laplas, perpindahan dalam domain s dapat dituliskan seperti berikut :

$$x(s) = \frac{k_1 d_1 - k_2 d_2}{[Ms^3 + bs^2 + (k - k_1 + k_2)s]} \quad (c11)$$

persamaan (c11) bisa di-invers laplas untuk mendapatkan persamaan perpindahan dalam domain waktu (t).

LAMPIRAN D

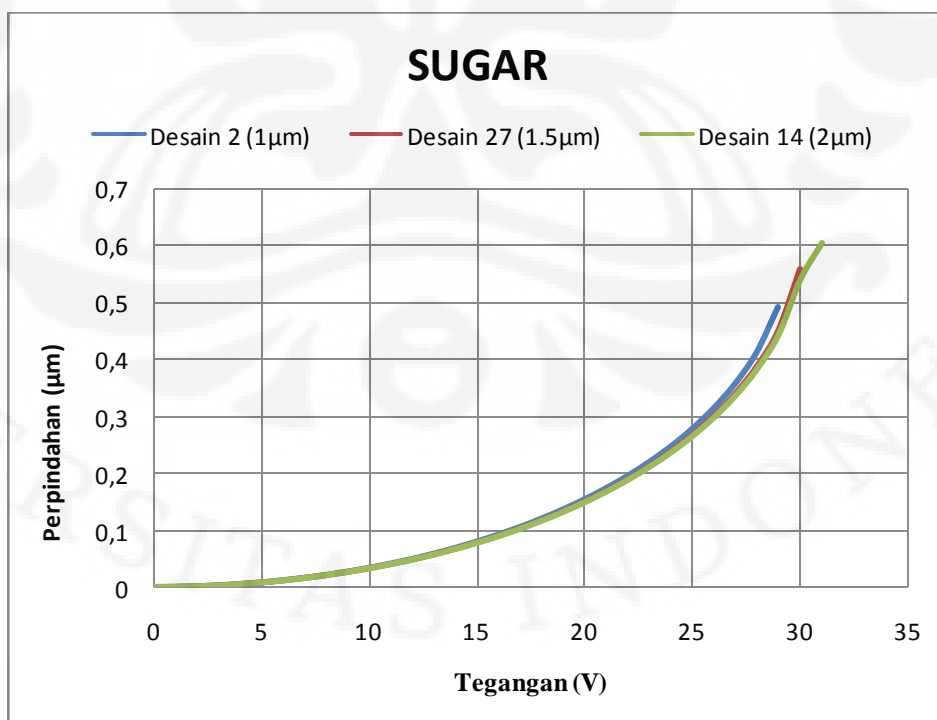
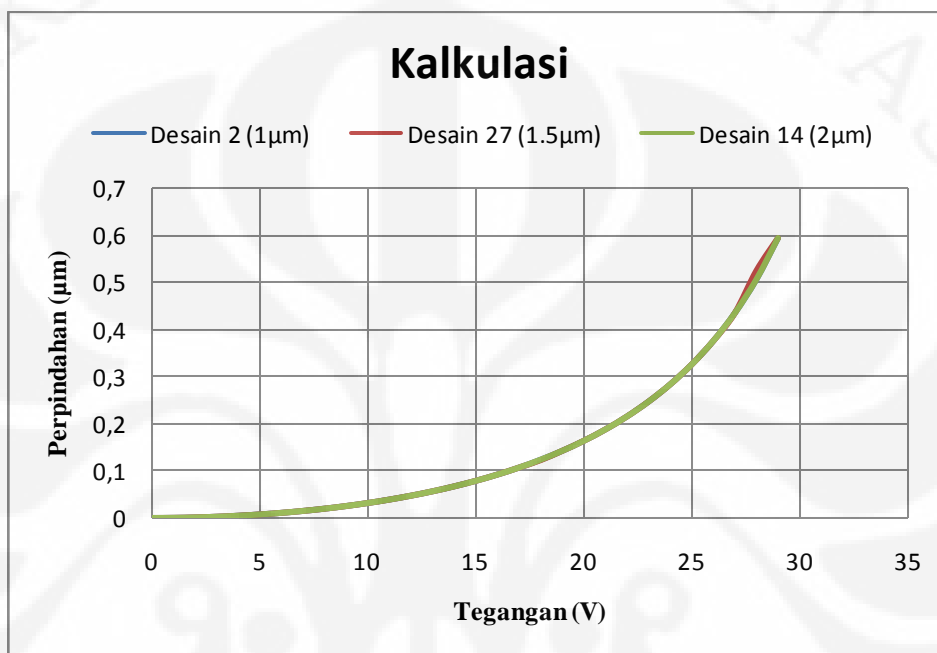
Spesifikasi Desain

Desain	Panjang <i>proofmass</i> (μm)	Lebar <i>proofmass</i> (μm)	Panjang <i>finger</i> (μm)	Tebal <i>finger</i> (μm)	Lebar <i>tether</i> (μm)	Panjang <i>tether</i> (μm)	Tebal <i>tether</i> (μm)	Tinggi desain (μm)	Gap kecil (μm)	Gap besar (μm)
1	40	28	50	1	3	100	1	30	2	3
2	67	28	50	1	3	100	1	30	2	3
3	67	28	50	1	3	100	2	30	2	3
4	67	28	50	1	3	100	1	30	2	3
5	40	56	50	1	3	100	1	30	2	3
6	40	14	50	1	3	100	1	30	2	3
7	40	28	50	1	2	100	2	30	2	3
8	40	28	50	1	5	100	5	30	2	3
9	40	28	50	1	3	100	1	30	2	3
10	40	28	50	1	3	200	1	30	2	3
11	40	28	100	1	3	50	1	30	2	3
12	40	28	25	1	3	100	1	30	2	3
13	67	28	50	1	3	100	1	30	5	3
14	67	28	50	2	3	100	1	30	2	3
15	40	28	50	1	3	100	1	60	2	3
16	40	28	50	1	3	100	1	15	2	3
17	67	28	50	1	3	100	1	30	2	3
18	67	28	50	1	3	100	1	30	2	3
19	40	28	50	1	4	100	4	30	2	3
20	40	28	50	1	6	100	6	30	2	3
21	40	28	50	1	3	150	1	30	2	3
22	40	28	50	1	3	250	1	30	2	3
23	40	28	75	1	3	100	1	30	2	3
24	40	28	125	1	3	100	1	30	2	3
25	67	28	50	1.5	3	100	1	30	2	3
26	100	28	50	1	3	100	1	30	2	4
27	67	28	50	1	3	100	1	30	2	3
28	67	28	50	1	3	100	1	30	2	8
29	67	28	50	1	3	100	1	30	3	8

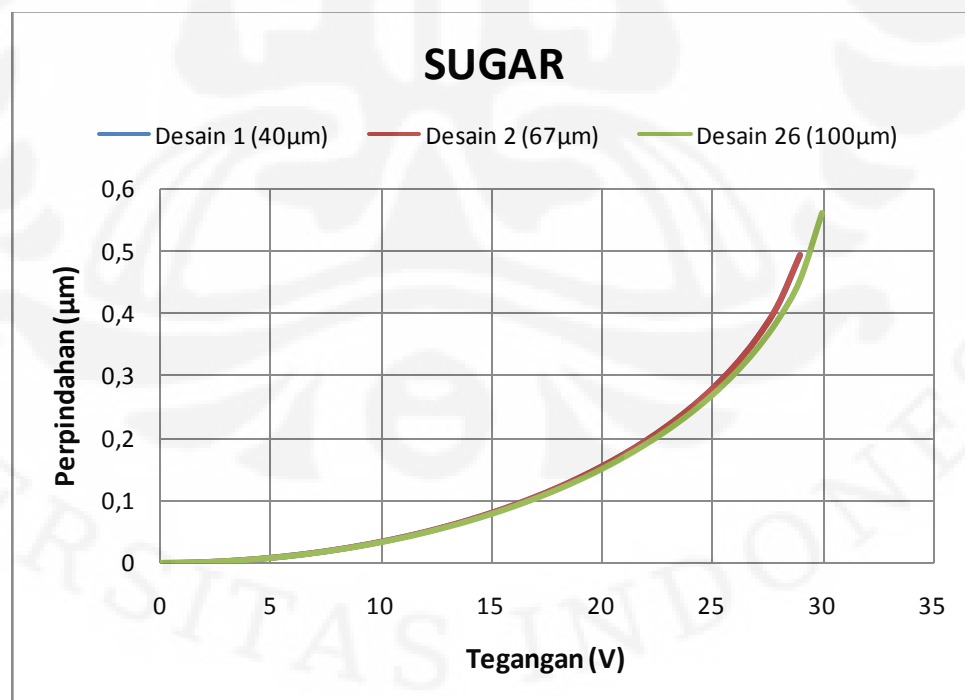
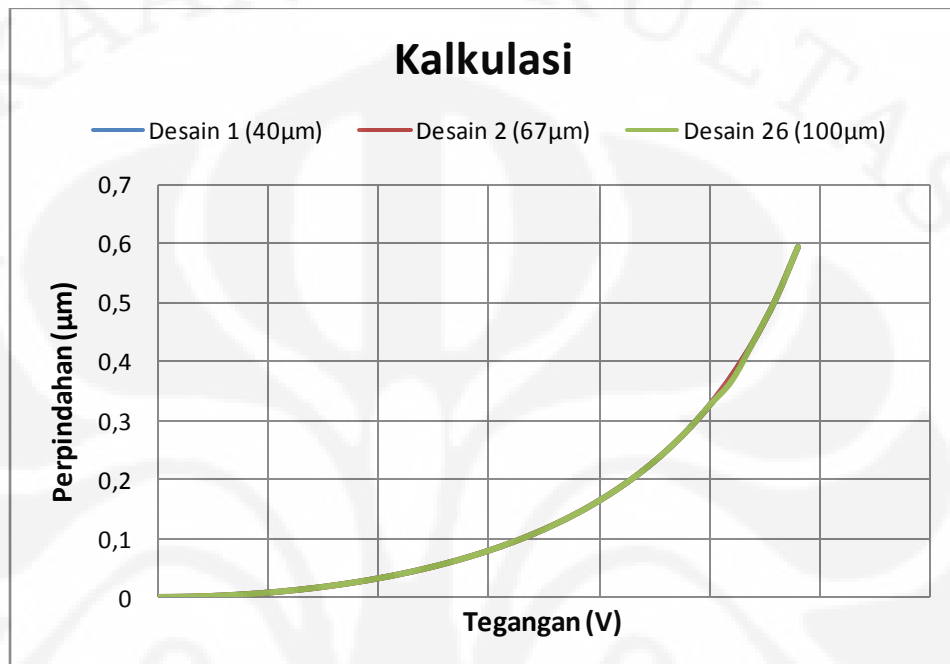
LAMPIRAN E

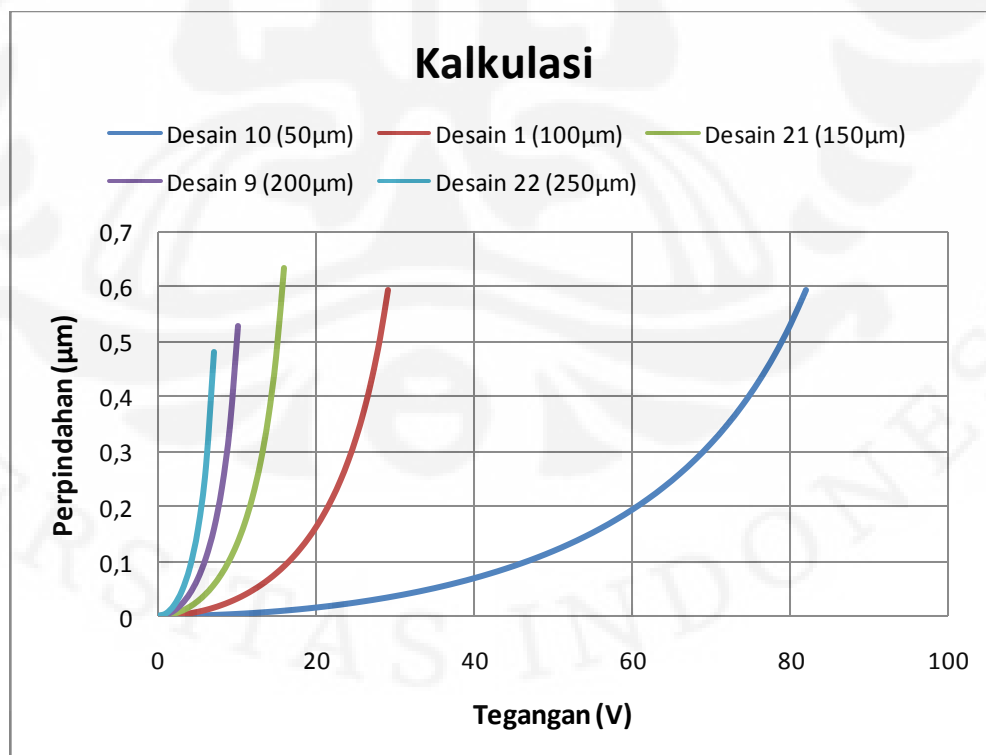
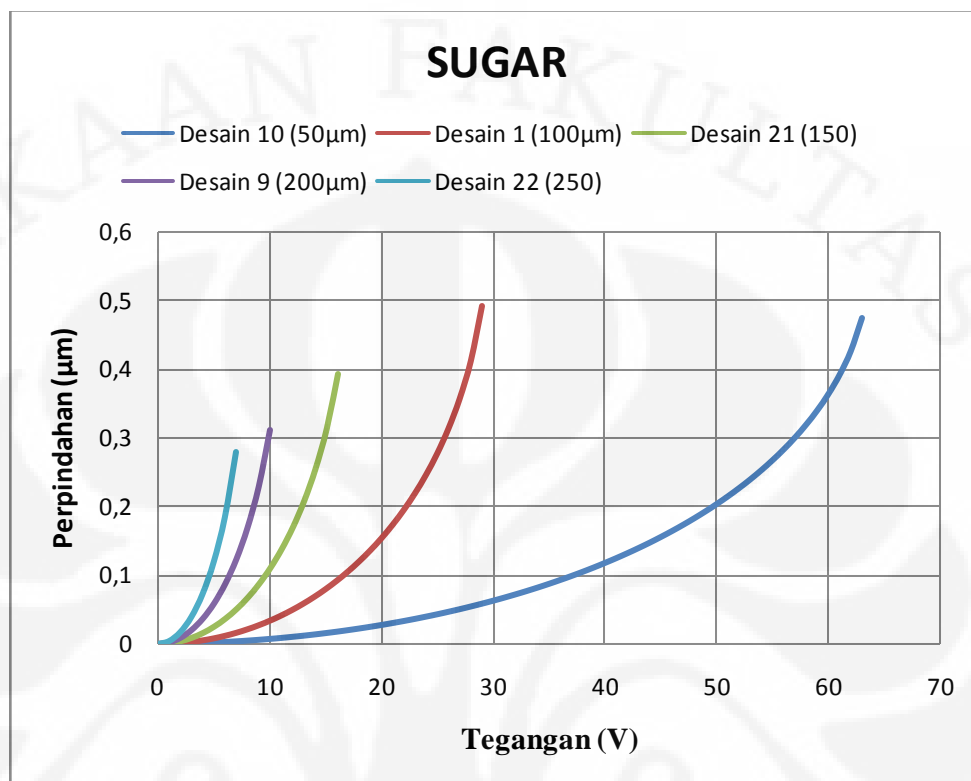
Grafik Perubahan Parameter

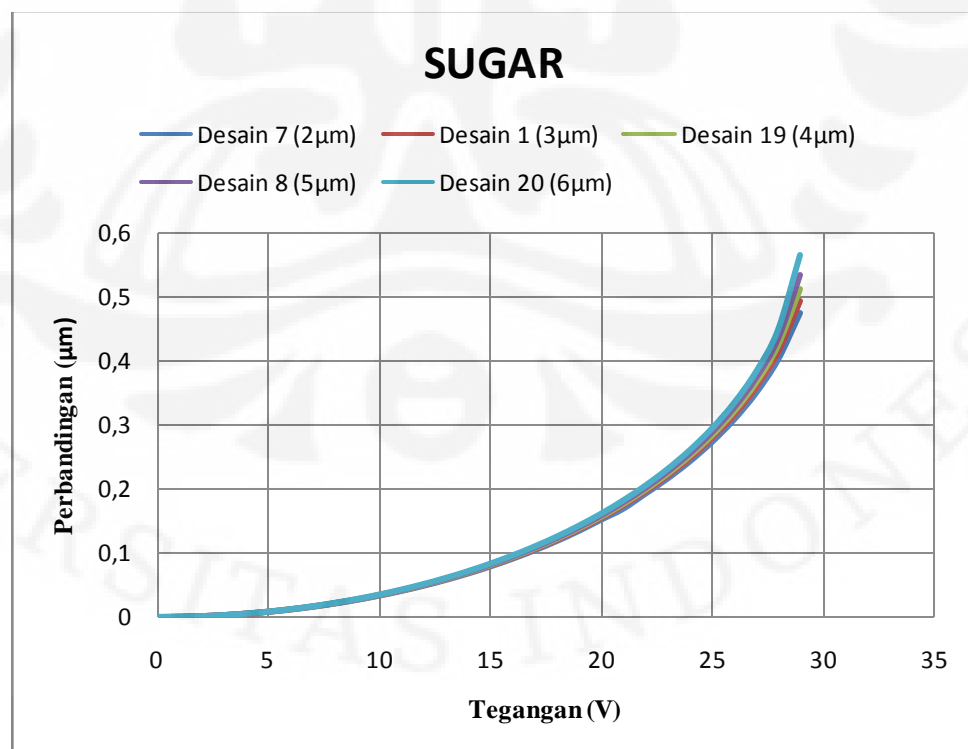
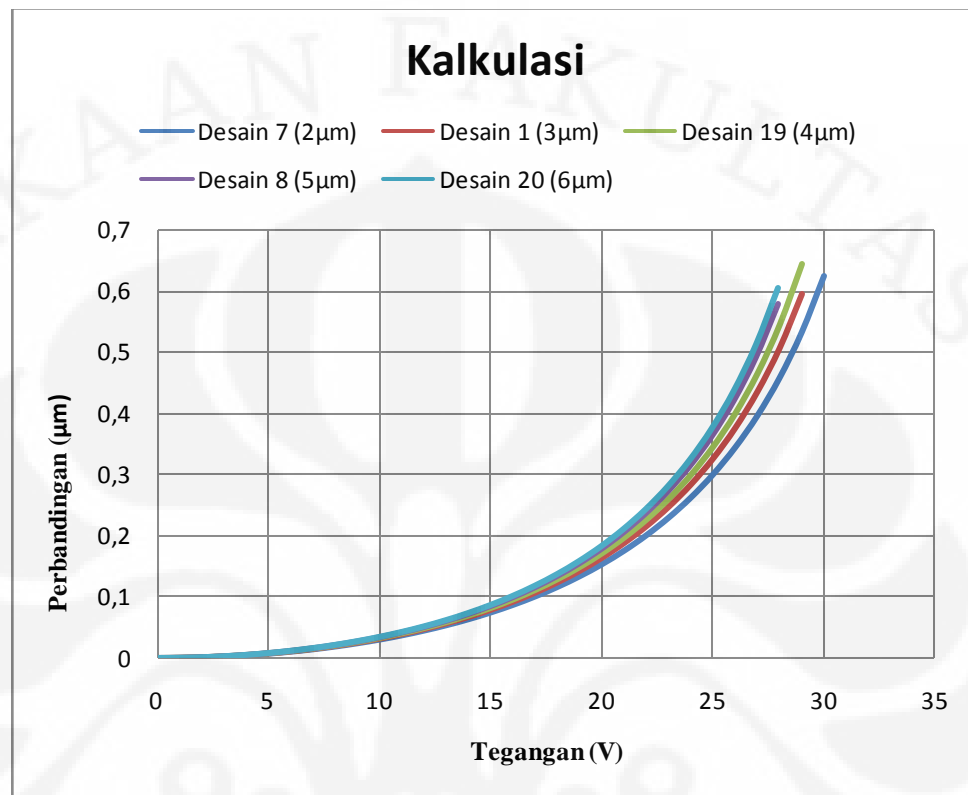
1. Lebar *proofmass*

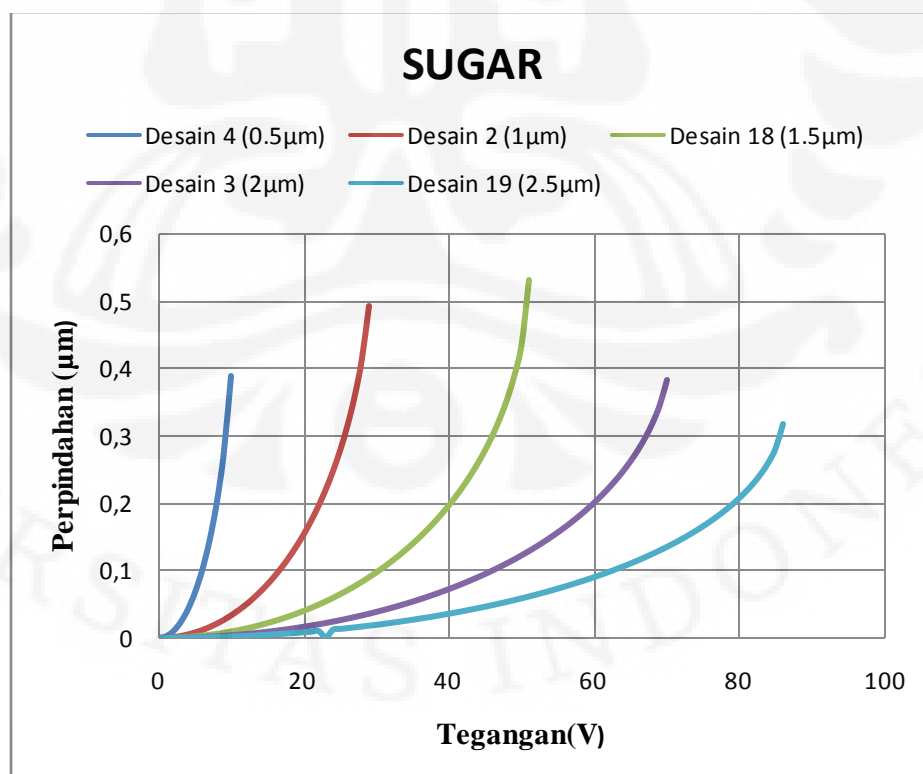
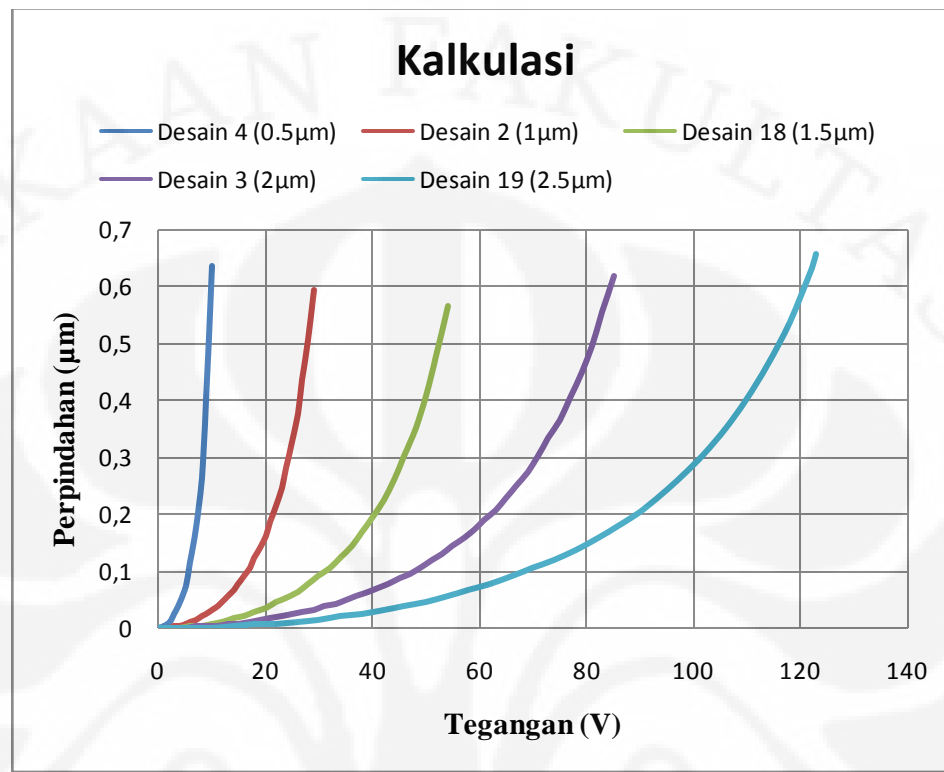


»

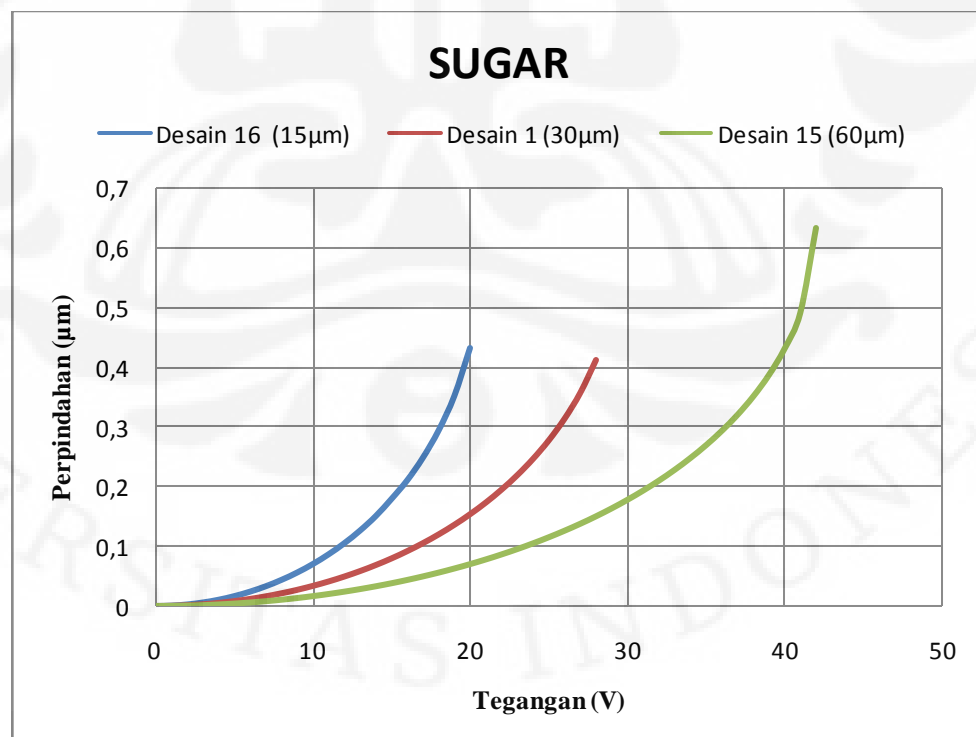
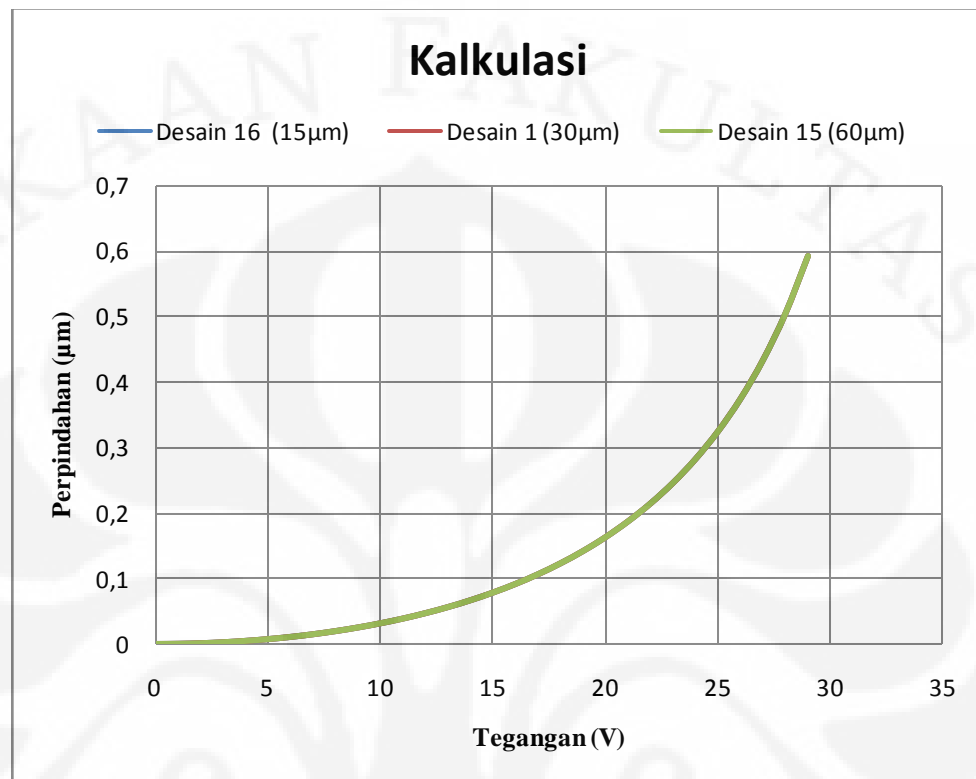
2. Panjang *proofmass*

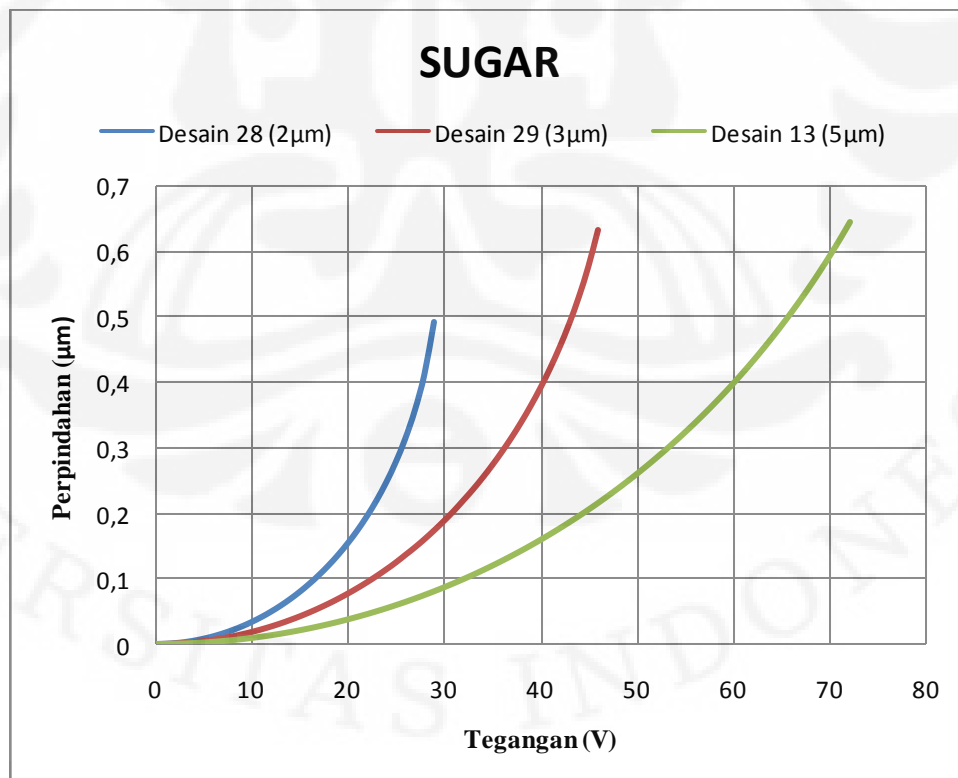
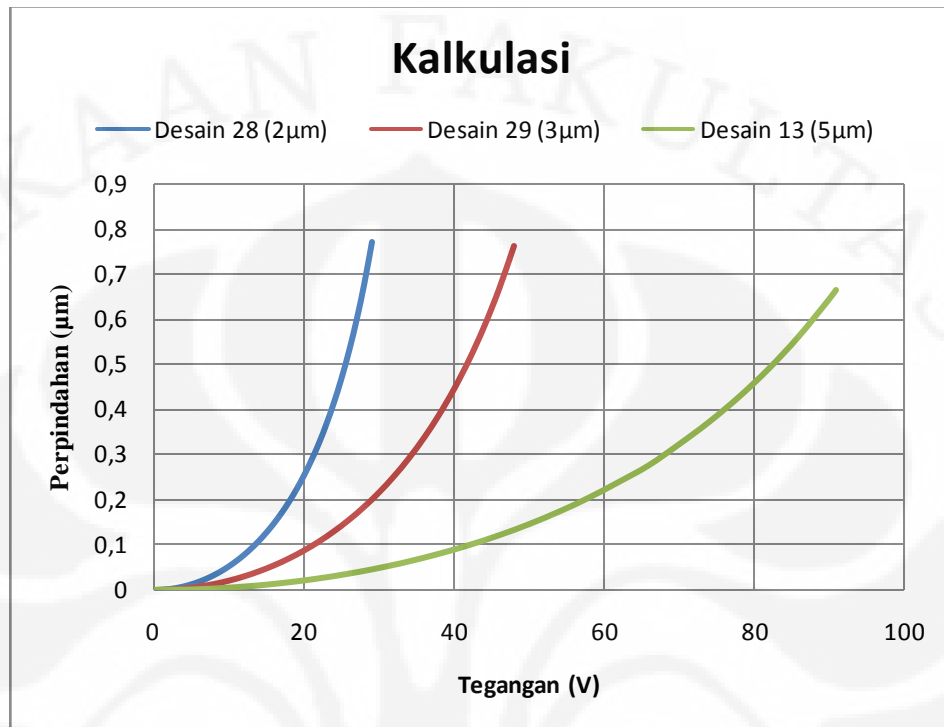
3. Panjang *tether*

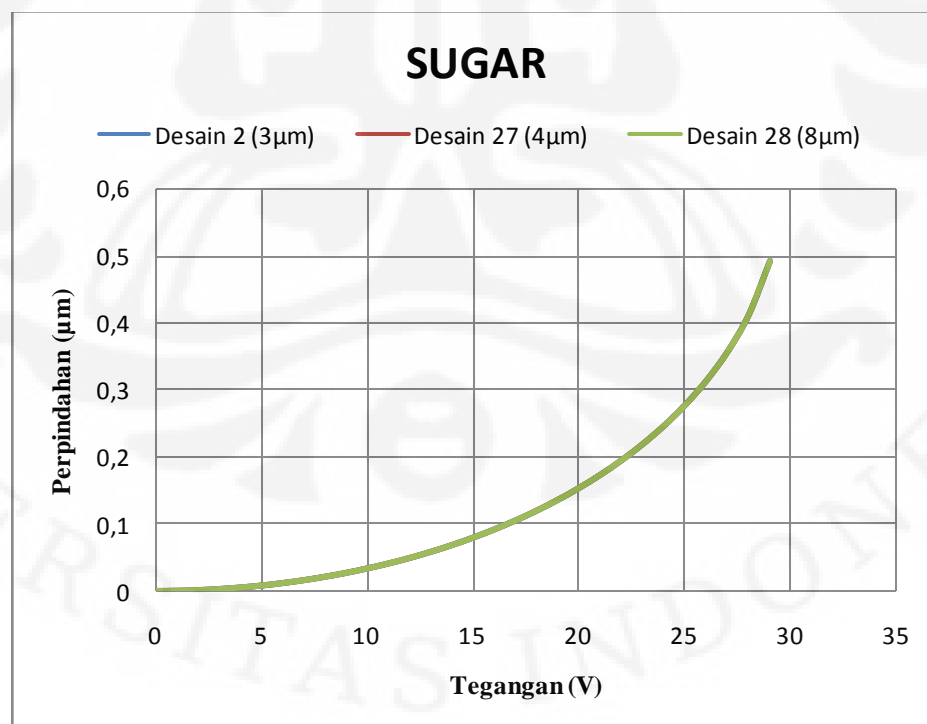
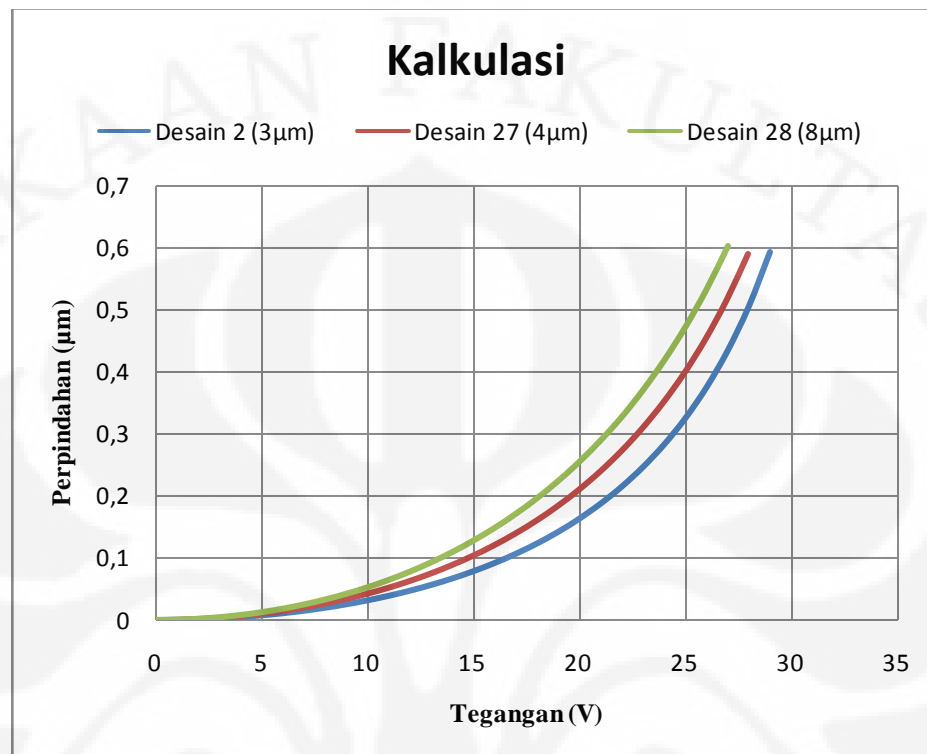
4. Lebar *tether*

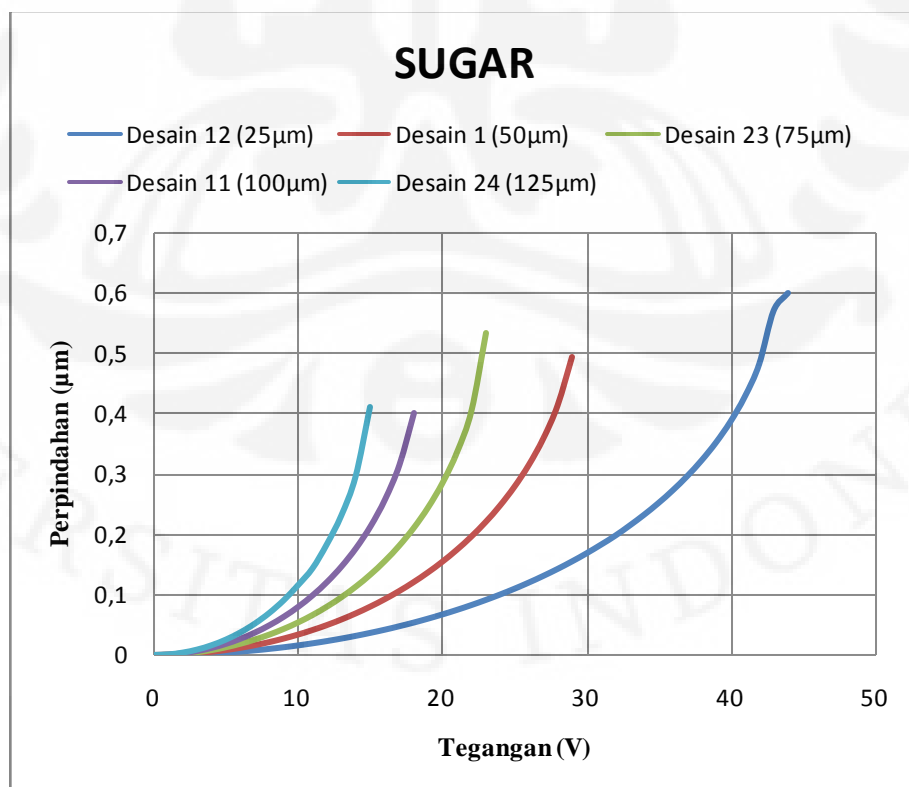
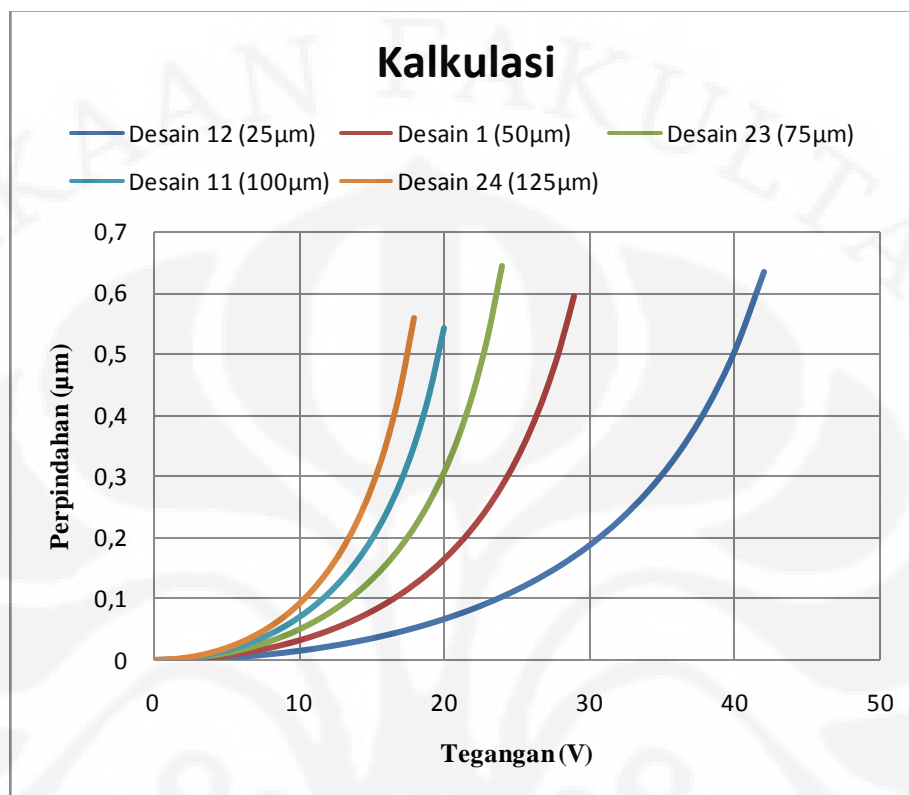
5. Tebal *tether*

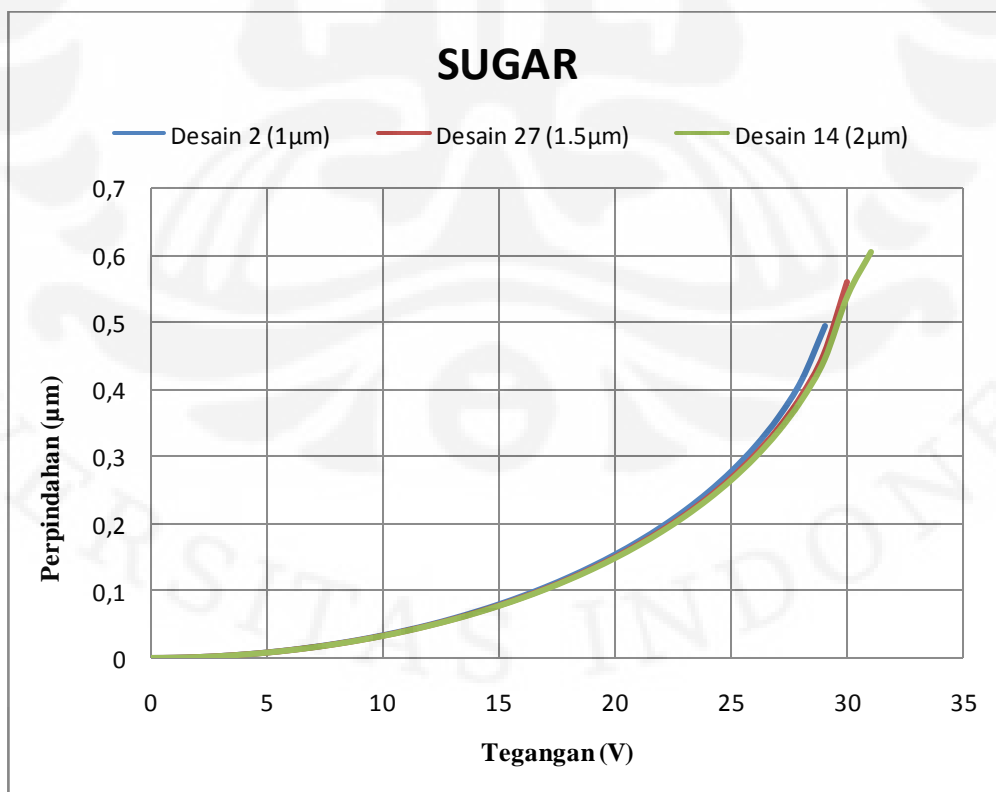
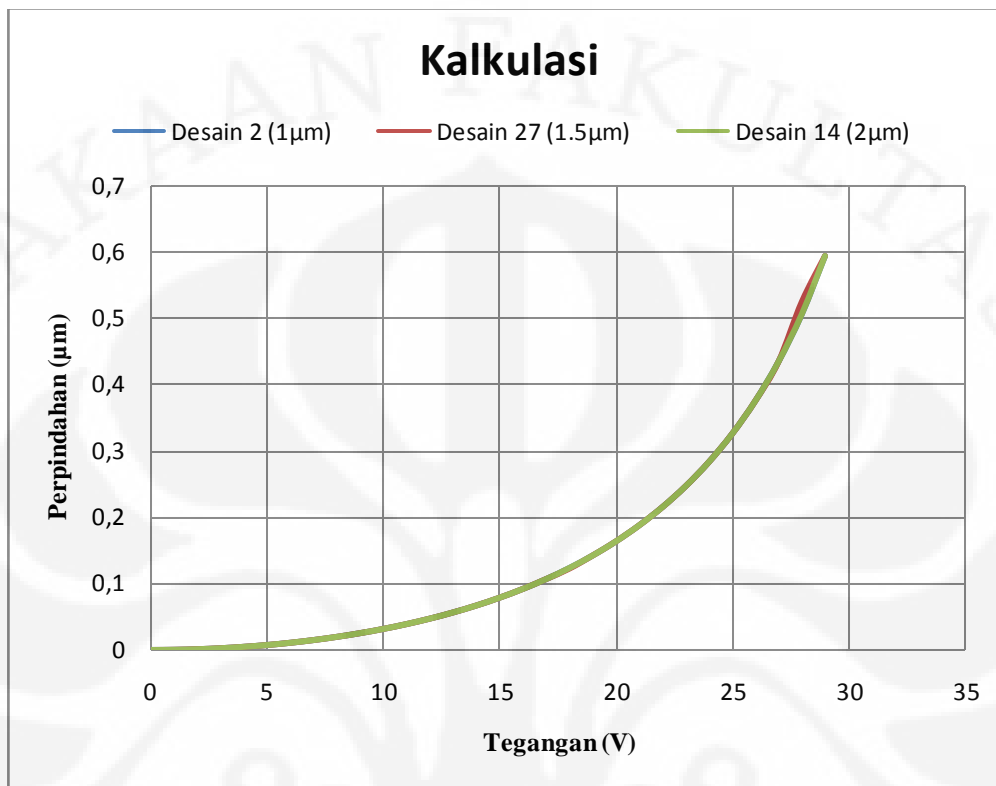
6. Tinggi desain



7. *Gap* kecil

8. *Gap* besar

9. Panjang *finger*

10. Tebal *finger*

LAMPIRAN F.1. Tabel Hasil Perpindahan Variasi gap Kecil

V	Desain 28 (2 μ m)			Desain 29 (3 μ m)			Desain 13 (5 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
1	0,0005	0,0003	34,6		0,0002			0,0001	
2	0,0020	0,0013	34,7	0,0008	0,0007	9,8	0,0002	0,0004	80,3
3	0,0045	0,0029	34,7		0,0016			0,0008	
4	0,0081	0,0053	34,8	0,0033	0,0029	9,9	0,0008	0,0015	80,3
5	0,0127	0,0082	34,9		0,0046			0,0023	
6	0,0183	0,0119	35,0	0,0074	0,0066	9,9	0,0019	0,0034	80,3
7	0,0251	0,0163	35,3		0,0090			0,0046	
8	0,0331	0,0214	35,5	0,0132	0,0118	10,0	0,0033	0,0060	80,3
9	0,0423	0,0272	35,7		0,0150			0,0076	
10	0,0528	0,0338	35,9	0,0207	0,0186	10,2	0,0052	0,0094	80,3
11	0,0647	0,0412	36,2		0,0225			0,0114	
12	0,0780	0,0495	36,5	0,0300	0,0269	10,3	0,0075	0,0136	80,2
13	0,0929	0,0587	36,8		0,0317			0,0159	
14	0,1095	0,0688	37,2	0,0412	0,0369	10,5	0,0103	0,0185	80,2
15	0,1280	0,0799	37,6		0,0425			0,0213	
16	0,1484	0,0921	37,9	0,0544	0,0486	10,7	0,0134	0,0242	80,2
17	0,1711	0,1055	38,3		0,0551			0,0274	
18	0,1962	0,1202	38,7	0,0697	0,0621	10,9	0,0171	0,0307	80,1
19	0,2240	0,1363	39,1		0,0695			0,0343	
20	0,2549	0,1541	39,6	0,0872	0,0774	11,2	0,0211	0,0381	80,1
21	0,2892	0,1736	40,0		0,0859			0,0420	
22	0,3270	0,1953	40,3	0,1071	0,0949	11,4	0,0257	0,0462	80,0
23	0,3700	0,2195	40,7		0,1044			0,0506	
24	0,4178	0,2467	40,9	0,1296	0,1145	11,6	0,0307	0,0552	80,0
25	0,4715	0,2778	41,1		0,1252			0,0600	
26	0,5322	0,3139	41,0	0,1549	0,1368	11,7	0,0361	0,0650	80,0
27	0,6010	0,3572	40,6		0,1485			0,0703	
28	0,6798	0,4123	39,3	0,1834	0,1612	12,1	0,0421	0,0758	79,9
29	0,7700	0,4924	36,1		0,1746			0,0815	
30				0,2153	0,1888	12,3	0,0486	0,0874	79,9
31					0,2038			0,0936	
32				0,2510	0,2200	12,3	0,0556	0,1000	79,8
33					0,2366			0,1066	
34				0,2911	0,2546	12,5	0,0631	0,1135	79,8
35					0,2737			0,1206	
36				0,3360	0,2941	12,5		0,1280	
37					0,3159			0,1357	
38				0,3865	0,3393	12,2	0,0799	0,1436	79,8
39					0,3644			0,1518	
40				0,4434	0,3917	11,7		0,1602	
41					0,4213			0,1690	
42				0,5076	0,4539	10,6	0,0990	0,1780	79,8
43					0,4901			0,1873	
44				0,5806	0,5308	8,6		0,1969	
45					0,5776			0,2069	
46				0,6638	0,6334	4,6	0,1207	0,2171	79,9
47								0,2277	
48				0,7594				0,2386	
49								0,2499	
50							0,1452	0,2615	80,1
51								0,2735	
52								0,2859	
53								0,2986	
54							0,1728	0,3118	80,4
55								0,3254	
56								0,3394	
57								0,3539	
58							0,2038	0,3689	81,0
59								0,3844	
60								0,4004	
61								0,4169	
62							0,2385	0,4340	82,0
63								0,4518	
64								0,4701	
65								0,4892	
66							0,2752	0,5089	84,9
67								0,5294	
68								0,5508	
69								0,5730	
70							0,3212	0,5961	85,6

F.2. Tabel Hasil Perpindahan Variasi *gap* Besar

V	Desain 2 (3 μ m)			Desain 27 (4 μ m)			Desain 28 (8 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,0003	0,0003	10,3	0,0004	0,0003	18,3	0,0005	0,0003	34,6
2	0,0012	0,0013	10,2	0,0016	0,0013	18,3	0,0020	0,0013	34,7
3	0,0027	0,0029	10,0	0,0036	0,0029	18,4	0,0045	0,0029	34,7
4	0,0048	0,0053	9,7	0,0065	0,0053	18,6	0,0081	0,0053	34,8
5	0,0075	0,0082	9,4	0,0101	0,0082	18,8	0,0127	0,0082	34,9
6	0,0109	0,0119	9,0	0,0147	0,0119	19,0	0,0183	0,0119	35,0
7	0,0150	0,0163	8,4	0,0202	0,0163	19,3	0,0251	0,0163	35,3
8	0,0198	0,0214	7,8	0,0266	0,0214	19,6	0,0331	0,0214	35,5
9	0,0254	0,0272	7,2	0,0340	0,0272	20,0	0,0423	0,0272	35,7
10	0,0318	0,0338	6,4	0,0425	0,0338	20,4	0,0528	0,0338	35,9
11	0,0391	0,0412	5,6	0,0521	0,0412	20,9	0,0647	0,0412	36,2
12	0,0473	0,0494	4,4	0,0630	0,0495	21,4	0,0780	0,0495	36,5
13	0,0566	0,0587	3,6	0,0751	0,0587	21,9	0,0929	0,0587	36,8
14	0,0671	0,0688	2,5	0,0887	0,0688	22,5	0,1095	0,0688	37,2
15	0,0788	0,0799	1,4	0,1039	0,0799	23,1	0,1280	0,0799	37,6
16	0,0920	0,0921	0,1	0,1208	0,0921	23,7	0,1484	0,0921	37,9
17	0,1068	0,1055	1,2	0,1396	0,1055	24,4	0,1711	0,1055	38,3
18	0,1235	0,1202	2,7	0,1606	0,1202	25,2	0,1962	0,1202	38,7
19	0,1423	0,1363	4,2	0,1840	0,1363	25,9	0,2240	0,1363	39,1
20	0,1635	0,1541	5,8	0,2102	0,1541	26,7	0,2549	0,1541	39,6
21	0,1876	0,1736	7,5	0,2394	0,1736	27,5	0,2892	0,1736	40,0
22	0,2151	0,1953	9,2	0,2723	0,1953	28,3	0,3270	0,1953	40,3
23	0,2466	0,2195	11,0	0,3094	0,2195	29,1	0,3700	0,2195	40,7
24	0,2830	0,2467	12,8	0,3514	0,2467	29,8	0,4178	0,2467	40,9
25	0,3253	0,2778	14,6	0,3992	0,2778	30,4	0,4715	0,2778	41,1
26	0,3751	0,3140	16,3	0,4539	0,3139	30,8	0,5322	0,3139	41,0
27	0,4343	0,3572	17,7	0,5171	0,3572	30,9	0,6010	0,3572	40,6
28	0,5058	0,4123	18,5	0,5907	0,4123	30,2		0,4123	
29	0,5935	0,4924	17,0		0,4924			0,4924	

F.3. Tabel Hasil Perpindahan Variasi *gap* Kecil Lebar *Proofmass*

V	Desain 6 (14 μ m)			Desain 1 (28 μ m)			Desain 5 (56 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,0003	0,0003	1,7	0,0003	0,0003	10,3	0,0003	0,0004	40,3
2	0,0012	0,0012	1,8	0,0012	0,0013	10,3	0,0012	0,0017	40,1
3	0,0027	0,0026	2,0	0,0027	0,0029	10,0	0,0027	0,0038	40,0
4	0,0048	0,0047	2,3	0,0048	0,0053	9,7	0,0048	0,0067	39,7
5	0,0075	0,0073	2,7	0,0075	0,0082	9,3	0,0075	0,0105	39,4
6	0,0109	0,0106	3,1	0,0109	0,0119	9,0	0,0109	0,0152	39,0
7	0,0150	0,0145	3,6	0,0150	0,0163	8,5	0,0150	0,0208	38,5
8	0,0198	0,0190	4,2	0,0198	0,0214	7,9	0,0198	0,0273	38,0
9	0,0254	0,0242	4,8	0,0254	0,0272	7,2	0,0254	0,0349	37,4
10	0,0318	0,0300	5,6	0,0318	0,0338	6,4	0,0318	0,0434	36,7
11	0,0391	0,0366	6,4	0,0391	0,0412	5,6	0,0391	0,0531	35,9
12	0,0473	0,0438	7,3	0,0473	0,0495	4,6	0,0473	0,0639	35,1
13	0,0566	0,0519	8,3	0,0566	0,0587	3,7	0,0566	0,0760	34,3
14	0,0671	0,0607	9,6	0,0671	0,0688	2,5	0,0671	0,0895	33,4
15	0,0788	0,0705	10,6	0,0789	0,0799	1,3	0,0788	0,1044	32,4
16	0,0920	0,0811	11,9	0,0920	0,0921	0,1	0,0920	0,1210	31,5
17	0,1068	0,0927	13,2	0,1068	0,1055	1,2	0,1068	0,1394	30,5
18	0,1235	0,1053	14,7	0,1235	0,1202	2,7	0,1235	0,1599	29,5
19	0,1423	0,1191	16,3	0,1423	0,1363	4,2	0,1423	0,1829	28,5
20	0,1635	0,1342	17,9	0,1635	0,1541	5,8	0,1635	0,2088	27,7
21	0,1876	0,1507	19,7	0,1877	0,1736	7,5	0,1876	0,2383	27,0
22	0,2151	0,1688	21,5	0,2150	0,1953	9,2	0,2151	0,2724	26,7
23	0,2466	0,1886	23,5	0,2465	0,2195	11,0	0,2466	0,3128	26,9
24	0,2830	0,2106	25,6	0,2829	0,2467	12,8	0,2830	0,3626	28,2
25	0,3253	0,2351	27,7	0,3253	0,2778	14,6	0,3253	0,4292	31,9
26	0,3751	0,2627	30,0	0,3752	0,3139	16,3	0,3751	0,5459	45,5
27	0,4343	0,2941	32,3	0,4345	0,3572	17,8	0,4343	0,5820	34,0
28	0,5058	0,3308	34,6	0,5056	0,4123	18,5	0,5058		
29	0,5935	0,3751	36,8	0,5934	0,4924	17,0	0,5935		
30		0,4322							
31		0,5196							

F.4. Tabel Hasil Perpindahan Variasi gap Kecil Panjang Proofmass

V	Desain 1 (40 μ m)			Desain 2 (67 μ m)			Desain 26 (100 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,0003	0,0003	10,3	0,0003	0,0003	10,3	0,0003	0,0003	8,2
2	0,0012	0,0013	10,3	0,0012	0,0013	10,2	0,0012	0,0013	8,1
3	0,0027	0,0029	10,0	0,0027	0,0029	10,0	0,0027	0,0029	7,9
4	0,0048	0,0053	9,7	0,0048	0,0053	9,7	0,0048	0,0052	7,6
5	0,0075	0,0082	9,3	0,0075	0,0082	9,4	0,0075	0,0081	7,3
6	0,0109	0,0119	9,0	0,0109	0,0119	9,0	0,0109	0,0117	6,8
7	0,0150	0,0163	8,5	0,0150	0,0163	8,4	0,0150	0,0160	6,3
8	0,0198	0,0214	7,9	0,0198	0,0214	7,8	0,0198	0,0209	5,7
9	0,0254	0,0272	7,2	0,0254	0,0272	7,2	0,0254	0,0267	5,0
10	0,0318	0,0338	6,4	0,0318	0,0338	6,4	0,0318	0,0331	4,2
11	0,0391	0,0412	5,6	0,0391	0,0412	5,6	0,0391	0,0404	3,4
12	0,0473	0,0495	4,6	0,0473	0,0494	4,4	0,0473	0,0485	2,4
13	0,0566	0,0587	3,7	0,0566	0,0587	3,6	0,0566	0,0574	1,4
14	0,0671	0,0688	2,5	0,0671	0,0688	2,5	0,0671	0,0673	0,3
15	0,0789	0,0799	1,3	0,0788	0,0799	1,4	0,0788	0,0781	0,9
16	0,0920	0,0921	0,1	0,0920	0,0921	0,1	0,0920	0,0900	2,2
17	0,1068	0,1055	1,2	0,1068	0,1055	1,2	0,1068	0,1030	3,6
18	0,1235	0,1202	2,7	0,1235	0,1202	2,7	0,1235	0,1173	5,1
19	0,1423	0,1363	4,2	0,1423	0,1363	4,2	0,1423	0,1329	6,6
20	0,1635	0,1541	5,8	0,1635	0,1541	5,8	0,1635	0,1500	8,3
21	0,1877	0,1736	7,5	0,1876	0,1736	7,5	0,1876	0,1688	10,0
22	0,2150	0,1953	9,2	0,2151	0,1953	9,2	0,2151	0,1896	11,9
23	0,2465	0,2195	11,0	0,2466	0,2195	11,0	0,2466	0,2126	13,8
24	0,2829	0,2467	12,8	0,2830	0,2467	12,8	0,2830	0,2384	15,8
25	0,3253	0,2778	14,6	0,3253	0,2778	14,6	0,3253	0,2675	17,8
26	0,3752	0,3139	16,3	0,3751	0,3140	16,3	0,3667	0,3010	17,9
27	0,4345	0,3572	17,8	0,4343	0,3572	17,7	0,4343	0,3403	21,6
28	0,5056	0,4123	18,5	0,5058	0,4123	18,5	0,5058	0,3884	23,2
29	0,5934	0,4924	17,0	0,5935	0,4924	17,0	0,5935	0,4519	23,8
30								0,5594	

F.5. Tabel Hasil Perpindahan Variasi Tebal Desain

V	Desain 16 (15 μ m)			Desain 1 (30 μ m)			Desain 15 (60 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,0003	0,0007	120,7	0,0003	0,0003	10,3	0,0003	0,0002	44,8
2	0,0012	0,0026	120,7	0,0012	0,0013	10,3	0,0012	0,0007	44,9
3	0,0027	0,0059	120,7	0,0027	0,0029	10,0	0,0027	0,0015	45,1
4	0,0048	0,0106	120,7	0,0048	0,0053	9,7	0,0048	0,0026	45,3
5	0,0075	0,0166	120,7	0,0075	0,0082	9,3	0,0075	0,0041	45,5
6	0,0109	0,0241	120,7	0,0109	0,0119	9,0	0,0109	0,0059	45,9
7	0,0150	0,0331	120,7	0,0150	0,0163	8,5	0,0150	0,0081	46,2
8	0,0198	0,0437	120,8	0,0198	0,0214	7,9	0,0198	0,0106	46,7
9	0,0254	0,0561	120,9	0,0254	0,0272	7,2	0,0254	0,0134	47,2
10	0,0318	0,0703	121,2	0,0318	0,0338	6,4	0,0318	0,0166	47,7
11	0,0391	0,0866	121,6	0,0391	0,0412	5,6	0,0391	0,0202	48,4
12	0,0473	0,1051	122,1	0,0473	0,0495	4,6	0,0473	0,0241	49,1
13	0,0566	0,1262	123,0	0,0566	0,0587	3,7	0,0566	0,0284	49,8
14	0,0671	0,1504	124,2	0,0671	0,0688	2,5	0,0671	0,0331	50,6
15	0,0788	0,1791	127,2	0,0789	0,0799	1,3	0,0788	0,0382	51,5
16	0,0920	0,2102	128,4	0,0920	0,0921	0,1	0,0920	0,0437	52,5
17	0,1068	0,2479	132,1	0,1068	0,1055	1,2	0,1068	0,0497	53,5
18	0,1235	0,2935	137,7	0,1235	0,1202	2,7	0,1235	0,0561	54,6
19	0,1423	0,3511	146,8	0,1423	0,1363	4,2	0,1423	0,0630	55,8
20	0,1635	0,4314	163,8	0,1635	0,1541	5,8	0,1635	0,0703	57,0
21	0,1876	0,6338	237,8	0,1877	0,1736	7,5	0,1876	0,0782	58,3
22	0,2151			0,2150	0,1953	9,2	0,2151	0,0866	59,8
23	0,2466			0,2465	0,2195	11,0	0,2466	0,0955	61,3
24	0,2830			0,2829	0,2467	12,8	0,2830	0,1051	62,9
25	0,3253			0,3253	0,2778	14,6	0,3253	0,1153	64,6
26	0,3751			0,3752	0,3139	16,3	0,3751	0,1262	66,3
27	0,4343			0,4345	0,3572	17,8	0,4343	0,1379	68,2
28	0,5057			0,5056	0,4123	18,5	0,5057	0,1504	70,3
29	0,5934			0,5934			0,5934	0,1637	72,4
30								0,1781	
31								0,1935	
32								0,2102	
33								0,2282	
34								0,2479	
35								0,2696	
36								0,2935	
37								0,3204	
38								0,3511	
39								0,3871	
40								0,4314	
41								0,4915	
42								0,6338	

F.6. Tabel Hasil Perpindahan Variasi Tebal *Finger*

V	Desain 2 (1 μ m)			Desain 27 (1.5 μ m)			Desain 14 (2 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0002961	0.00032667	10.321012	0.00029611	0.00032046	8.224912	0.000296	0.000319	7.714959
2	0.0011869	0.00130797	10.202485	0.00118688	0.0012831	8.107348	0.001187	0.001277	7.593393
3	0.0026799	0.00294793	10.002806	0.00267987	0.00289163	7.901959	0.00268	0.0028779	7.390741
4	0.0047871	0.00525327	9.7369655	0.00478714	0.00515247	7.631325	0.004787	0.0051279	7.118843
5	0.0075279	0.0082335	9.3724568	0.00752795	0.00807453	7.260769	0.007528	0.0080359	6.747128
6	0.0109245	0.0119027	8.9544903	0.01092445	0.01167	6.824622	0.010924	0.0116137	6.308959
7	0.0150073	0.01627267	8.4314494	0.01500766	0.015953	6.299064	0.015008	0.0158753	5.781551
8	0.019814	0.02136667	7.8362193	0.0198135	0.02094267	5.698955	0.019814	0.02084	5.18079
9	0.0253884	0.02720733	7.1644142	0.0253881	0.02666133	5.015085	0.025388	0.0265283	4.491218
10	0.0317855	0.03382167	6.4059955	0.03178469	0.03313367	4.244118	0.031785	0.0329663	3.717659
11	0.0390685	0.04124433	5.5692678	0.03906886	0.040392	3.386694	0.039069	0.0401847	2.856008
12	0.0473148	0.049392	4.3901648	0.04731562	0.048472	2.443969	0.047316	0.048233	1.938849
13	0.0566121	0.05867167	3.6379656	0.0566107	0.05741667	1.423693	0.056611	0.0571117	0.884925
14	0.067076	0.06878467	2.5473433	0.06707601	0.06727733	0.300141	0.067076	0.066912	0.244515
15	0.0788242	0.07990633	1.3728103	0.07882509	0.07811267	0.903803	0.078825	0.0776783	1.454812
16	0.0920192	0.092119	0.1084246	0.09201923	0.08999367	2.201238	0.092019	0.08948	2.759455
17	0.1068337	0.10551	1.2390487	0.10683482	0.10300667	3.583249	0.106835	0.1024033	4.147983
18	0.1235022	0.12020333	2.6710785	0.12255372	0.11725	4.327671	0.123501	0.11654	5.636045
19	0.1422897	0.13633	4.1884408	0.14228837	0.13285	6.633269	0.142288	0.1320133	7.221277
20	0.1635155	0.15406333	5.7805894	0.16352016	0.14996333	8.290617	0.16352	0.1489833	8.889931
21	0.1876286	0.17362467	7.4636377	0.18763062	0.16878667	10.04311	0.187631	0.1676267	10.66135
22	0.2150999	0.19531	9.2003096	0.21510124	0.18955667	11.87561	0.215105	0.1881867	12.51397
23	0.2466106	0.21949333	10.995998	0.24660883	0.21261333	13.78519	0.246609	0.2109767	14.44886
24	0.2829783	0.24672	12.813087	0.2829802	0.23839667	15.755	0.28298	0.2364267	16.45116
25	0.3253266	0.27778	14.615024	0.32532827	0.26754	17.76306	0.325328	0.2651367	18.5018
26	0.3751205	0.31396667	16.302452	0.37511972	0.30099667	19.75984	0.37512	0.298	20.55869
27	0.4343212	0.35724333	17.746746	0.43432033	0.34032333	21.64232	0.43432	0.3364667	22.5303
28	0.5057681	0.41229	18.482397	0.52422281	0.38839667	25.91	0.505767	0.3831367	24.24641
29	0.5934594	0.49238667	17.031118	0.59346064	0.45192667	23.84892	0.593461	0.4438333	25.21268
30					0.55941667			0.53973	
31								0.60388	

F.7. Tabel Hasil Perpindahan Variasi Panjang *Finger*

V	Desain 12 (25 μ m)			Desain 1 (50 μ m)			Desain 23 (75 μ m)			Desain 11 (100 μ m)			Desain 24 (125 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		0,0002		0,0003	0,0003	10,3	0,0004	0,0005	14,5	0,0006	0,0007	21,5	0,0008	0,0010	32,2
2	0,0006	0,0006	8,2	0,0012	0,0013	10,3	0,0018	0,0021	14,3	0,0024	0,0029	21,3	0,0030	0,0040	32,0
3		0,0014		0,0027	0,0029	10,0	0,0041	0,0046	14,0	0,0054	0,0066	21,0	0,0068	0,0090	31,7
4	0,0023	0,0025	8,0	0,0048	0,0053	9,7	0,0073	0,0083	13,6	0,0098	0,0118	20,5	0,0123	0,0162	31,3
5		0,0039		0,0075	0,0082	9,3	0,0115	0,0130	13,1	0,0155	0,0186	19,9	0,0196	0,0256	30,7
6	0,0053	0,0057	7,6	0,0109	0,0119	9,0	0,0167	0,0188	12,5	0,0227	0,0270	19,2	0,0288	0,0374	30,1
7		0,0077		0,0150	0,0163	8,5	0,0231	0,0258	11,8	0,0314	0,0372	18,3	0,0401	0,0519	29,4
8	0,0095	0,0101	7,0	0,0198	0,0214	7,9	0,0306	0,0340	10,9	0,0420	0,0493	17,4	0,0540	0,0694	28,7
9		0,0129		0,0254	0,0272	7,2	0,0395	0,0435	10,0	0,0546	0,0635	16,3	0,0707	0,0904	27,9
10	0,0150	0,0159	6,3	0,0318	0,0338	6,4	0,0499	0,0543	8,9	0,0695	0,0800	15,1	0,0907	0,1155	27,3
11		0,0194		0,0391	0,0412	5,6	0,0619	0,0666	7,7	0,0870	0,0991	13,8	0,1149	0,1432	24,6
12	0,0219	0,0231	5,4	0,0473	0,0495	4,6	0,0757	0,0806	6,4	0,1077	0,1212	12,5	0,1441	0,1831	27,1
13		0,0273		0,0566	0,0587	3,7	0,0917	0,0962	5,0	0,1322	0,1469	11,1	0,1796	0,2305	28,3
14	0,0304	0,0318	4,4	0,0671	0,0688	2,5	0,1101	0,1139	3,5	0,1613	0,1771	9,8	0,2232	0,2955	32,4
15		0,0367		0,0789	0,0799	1,3	0,1314	0,1338	1,8	0,1960	0,2132	8,7	0,2776	0,4104	47,8
16	0,0406	0,0419	3,2	0,0920	0,0921	0,1	0,1561	0,1563	0,1	0,2381	0,2574	8,1	0,3468		
17		0,0476		0,1068	0,1055	1,2	0,1848	0,1819	1,6	0,2895	0,3149	8,8	0,4372		
18	0,0527	0,0537	1,8	0,1235	0,1202	2,7	0,2187	0,2112	3,4	0,3535	0,4002	13,2	0,5592		
19		0,0602		0,1423	0,1363	4,2	0,2587	0,2455	5,1	0,4348					
20	0,0670	0,0672	0,3	0,1635	0,1541	5,8	0,3067	0,2864	6,6	0,5410					
21		0,0747		0,1877	0,1736	7,5	0,3649	0,3373	7,6						
22	0,0839	0,0827	1,4	0,2150	0,1953	9,2	0,4367	0,4063	6,9						
23		0,0912		0,2465	0,2195	11,0	0,5272	0,5349	1,5						
24	0,1037	0,1002	3,3	0,2829	0,2467	12,8	0,6445								
25		0,1099		0,3253	0,2778	14,6									
26	0,1270	0,1202	5,4	0,3752	0,3139	16,3									
27		0,1311		0,4345	0,3572	17,8									
28	0,1546	0,1428	7,6	0,5056	0,4123	18,5									
29		0,1553		0,5934	0,4924	17,0									
30	0,1875	0,1686	10,1												
31		0,1829													
32	0,2270	0,1979	12,8												
33		0,2148													
34	0,2751	0,2327	15,4												
35		0,2521													
36	0,3344	0,2734	18,2												
37		0,2969													
38	0,4090	0,3231	21,0												
39		0,3528													
40	0,5053	0,3872	23,4												
41		0,4289													
42	0,6337	0,4830	23,8												
43		0,5716													
44		0,6011													

F.8 Tabel Hasil Perpindahan Variasi Panjang *Tether*

V	Desain 10 (50 μ m)			Desain 1 (100 μ m)			Desain 21 (150 μ m)			Desain 9 (200 μ m)			Desain 22 (250 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		0.00006		0.0003	0.0003	10.3	0.0010	0.0010	1.4	0.0024	0.0022	6.6	0.0047	0.0042	9.7
2	0.00015	0.00024	65.0	0.0012	0.0013	10.3	0.0040	0.0040	1.8	0.0097	0.0090	7.6	0.0193	0.0171	11.5
3		0.00055		0.0027	0.0029	10.0	0.0092	0.0090	2.5	0.0224	0.0204	9.1	0.0461	0.0394	14.6
4	0.00059	0.00098	65.0	0.0048	0.0053	9.7	0.0166	0.0160	3.4	0.0415	0.0368	11.4	0.0894	0.0724	19.0
5		0.00153		0.0075	0.0082	9.3	0.0265	0.0253	4.7	0.0687	0.0589	14.3	0.1583	0.1188	25.0
6	0.00134	0.00220	64.8	0.0109	0.0119	9.0	0.0392	0.0368	6.1	0.1064	0.0873	17.9	0.2721	0.1835	32.6
7		0.00300		0.0150	0.0163	8.5	0.0552	0.0509	7.9	0.1590	0.1235	22.3	0.4806	0.2779	42.2
8	0.00238	0.00392	64.8	0.0198	0.0214	7.9	0.0751	0.0676	10.0	0.2343	0.1696	27.6			
9		0.00497		0.0254	0.0272	7.2	0.0997	0.0874	12.4	0.3470	0.2294	33.9			
10	0.00373	0.00615	64.7	0.0318	0.0338	6.4	0.1302	0.1105	15.1	0.5288	0.3116	41.1			
11		0.00745		0.0391	0.0412	5.6	0.1683	0.1377	18.2						
12	0.00539	0.00888	64.6	0.0473	0.0495	4.6	0.2164	0.1698	21.6						
13		0.01044		0.0566	0.0587	3.7	0.2784	0.2079	25.3						
14	0.00737	0.01213	64.5	0.0671	0.0688	2.5	0.3603	0.2542	29.5						
15		0.01396		0.0789	0.0799	1.3	0.4724	0.3126	33.8						
16	0.00968	0.01592	64.4	0.0920	0.0921	0.1	0.6337	0.3921	38.1						
17		0.01801		0.1068	0.1055	1.2									
18	0.01233	0.02024	64.2	0.1235	0.1202	2.7									
19		0.02262		0.1423	0.1363	4.2									
20	0.01532	0.02514	64.0	0.1635	0.1541	5.8									
21		0.02780		0.1877	0.1736	7.5									
22	0.01868	0.03061	63.8	0.2150	0.1953	9.2									
23		0.03357		0.2465	0.2195	11.0									
24	0.02242	0.03669	63.7	0.2829	0.2467	12.8									
25		0.03997		0.3253	0.2778	14.6									
26	0.02655	0.04341	63.5	0.3752	0.3139	16.3									
27		0.04701		0.4345	0.3572	17.8									
28	0.03110	0.05078	63.3	0.5056	0.4123	18.5									
29		0.05473		0.5934	0.4924	17.0									
30	0.03609	0.05886	63.1												
31		0.06318													
32	0.04155	0.06768	62.9												
33		0.07239													
34	0.04750	0.07730	62.7												
35		0.08242													
36	0.05397	0.08777	62.6												
37		0.09335													
38	0.06101	0.09916	62.5												
39		0.10523													
40	0.06866	0.11156	62.5												
41		0.11817													
42	0.07696	0.12508	62.5												
43		0.13229													
44	0.08598	0.13983	62.6												
45		0.14769													
46	0.09576	0.15598	62.9												
47		0.16465													
48	0.10637	0.17374	63.3												
49		0.18333													
50	0.11792	0.19336	64.0												
51		0.20398													
52	0.13046	0.21521	65.0												
53		0.22713													
54	0.14414	0.23981	66.4												
55		0.25336													
56	0.15904	0.26791	68.5												
57		0.28363													
58	0.17534	0.30074	71.5												
59		0.31963													
60	0.19318	0.34055	76.3												
61		0.36441													
62	0.21277	0.39236	84.4												
63		0.42688													
64	0.23434	0.47503	102.7												

F.9. Tabel Hasil Perpindahan Variasi Lebar *Tether*

v	Desain 7 (2 μ m)			Desain 1 (3 μ m)			Desain 19 (4 μ m)			Desain 8 (5 μ m)			Desain 20 (6 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0	0
1	0,0003	0,0003	14,2	0,0003	0,0003	10,3	0,0003	0,0003	8,0	0,0003	0,0003	6,5	0,0003	0,0003	5,7
2	0,0011	0,0013	14,1	0,0012	0,0013	10,3	0,0012	0,0013	7,9	0,0013	0,0013	6,4	0,0013	0,0014	5,5
3	0,0026	0,0029	13,9	0,0027	0,0029	10,0	0,0028	0,0030	7,6	0,0028	0,0030	6,2	0,0029	0,0031	5,3
4	0,0046	0,0052	13,6	0,0048	0,0053	9,7	0,0050	0,0053	7,4	0,0051	0,0054	5,9	0,0052	0,0054	5,0
5	0,0072	0,0081	13,3	0,0075	0,0082	9,3	0,0078	0,0083	7,0	0,0080	0,0084	5,5	0,0082	0,0085	4,6
6	0,0104	0,0118	12,9	0,0109	0,0119	9,0	0,0113	0,0120	6,6	0,0116	0,0122	5,1	0,0118	0,0123	4,2
7	0,0143	0,0161	12,4	0,0150	0,0163	8,5	0,0155	0,0165	6,0	0,0160	0,0167	4,5	0,0163	0,0169	3,6
8	0,0189	0,0211	11,8	0,0198	0,0214	7,9	0,0205	0,0216	5,4	0,0211	0,0219	3,9	0,0215	0,0222	3,0
9	0,0242	0,0269	11,2	0,0254	0,0272	7,2	0,0263	0,0275	4,7	0,0270	0,0279	3,2	0,0276	0,0282	2,3
10	0,0302	0,0334	10,4	0,0318	0,0338	6,4	0,0330	0,0342	3,9	0,0339	0,0347	2,4	0,0346	0,0351	1,4
11	0,0371	0,0407	9,6	0,0391	0,0412	5,6	0,0405	0,0418	3,1	0,0417	0,0423	1,5	0,0426	0,0428	0,5
12	0,0449	0,0489	8,8	0,0473	0,0495	4,6	0,0491	0,0501	2,1	0,0505	0,0508	0,5	0,0517	0,0514	0,5
13	0,0537	0,0579	7,8	0,0566	0,0587	3,7	0,0588	0,0594	1,1	0,0605	0,0602	0,6	0,0619	0,0609	1,6
14	0,0636	0,0679	6,8	0,0671	0,0688	2,5	0,0697	0,0697	0,1	0,0718	0,0706	1,7	0,0735	0,0715	2,8
15	0,0746	0,0788	5,7	0,0789	0,0799	1,3	0,0820	0,0810	1,3	0,0845	0,0820	3,0	0,0866	0,0831	4,1
16	0,0870	0,0909	4,5	0,0920	0,0921	0,1	0,0959	0,0934	2,6	0,0989	0,0946	4,3	0,1013	0,0958	5,4
17	0,1008	0,1041	3,2	0,1068	0,1055	1,2	0,1114	0,1070	4,0	0,1150	0,1084	5,8	0,1180	0,1098	6,9
18	0,1164	0,1185	1,9	0,1235	0,1202	2,7	0,1290	0,1219	5,5	0,1333	0,1236	7,3	0,1368	0,1252	8,5
19	0,1338	0,1344	0,4	0,1423	0,1363	4,2	0,1488	0,1383	7,1	0,1540	0,1402	9,0	0,1582	0,1421	10,2
20	0,1534	0,1518	1,0	0,1635	0,1541	5,8	0,1713	0,1563	8,8	0,1775	0,1586	10,7	0,1826	0,1608	11,9
21	0,1756	0,1689	3,8	0,1877	0,1736	7,5	0,1970	0,1762	10,5	0,2044	0,1789	12,5	0,2105	0,1815	13,8
22	0,2007	0,1923	4,2	0,2150	0,1953	9,2	0,2263	0,1984	12,4	0,2353	0,2014	14,4	0,2427	0,2045	15,7
23	0,2294	0,2159	5,9	0,2465	0,2195	11,0	0,2601	0,2231	14,2	0,2710	0,2266	16,4	0,2800	0,2302	17,8
24	0,2622	0,2426	7,5	0,2829	0,2467	12,8	0,2994	0,2509	16,2	0,3126	0,2552	18,4	0,3236	0,2594	19,8
25	0,3002	0,2728	9,1	0,3253	0,2778	14,6	0,3454	0,2828	18,1	0,3617	0,2879	20,4	0,3752	0,2931	21,9
26	0,3444	0,3078	10,6	0,3752	0,3139	16,3	0,3998	0,3201	19,9	0,4201	0,3264	22,3	0,4371	0,3328	23,9
27	0,3963	0,3496	11,8	0,4345	0,3572	17,8	0,4652	0,3652	21,5	0,4908	0,3733	23,9	0,5123	0,3816	25,5
28	0,4582	0,4019	12,3	0,5056	0,4123	18,5	0,5449	0,4232	22,3	0,5777	0,4348	24,7	0,6056	0,4469	26,2
29	0,5329	0,4752	10,8	0,5934	0,4924	17,0	0,6441	0,5119	20,5		0,5349			0,5642	
30	0,6248														

F.10. Tabel Hasil Perpindahan Variasi Tebal *Tether*

V	Desain 4 (0.5 μ m)			Desain 2 (1 μ m)			Desain 18 (1.5 μ m)			Desain 3 (2 μ m)			Desain 19 (2.5 μ m)		
	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error	Kalkulasi	Sugar	%error
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,0026	0,0025	2,0	0,0003	0,0003	10,3			0,0001		0,0001	0,00004	70,2		0,00002
2	0,0105	0,0102	3,1	0,0012	0,0013	10,2	0,0003		0,0004	15,3		0,0002		0,0001	69,2
3	0,0244	0,0232	4,8	0,0027	0,0029	10,0			0,0009		0,0005	0,0004	33,0		0,0002
4	0,0453	0,0420	7,2	0,0048	0,0053	9,7	0,0013		0,0015	15,2		0,0007			0,0003
5	0,0753	0,0674	10,4	0,0075	0,0082	9,4			0,0024		0,0012	0,0010	17,4		0,0005
6	0,1175	0,1005	14,4	0,0109	0,0119	9,0	0,0030		0,0035	15,0		0,0015		0,0006	0,0008
7	0,1774	0,1432	19,3	0,0150	0,0163	8,4			0,0048		0,0022	0,0020	9,0		0,0010
8	0,2654	0,1988	25,1	0,0198	0,0214	7,8	0,0054		0,0062	14,7		0,0026			0,0014
9	0,4020	0,2741	31,8	0,0254	0,0272	7,2			0,0079		0,0035	0,0033	3,8		0,0017
10	0,6363	0,3883	39,0	0,0318	0,0338	6,4	0,0085		0,0098	14,4		0,0041		0,0017	0,0021
11				0,0391	0,0412	5,6			0,0118		0,0050	0,0050	0,4		0,0026
12				0,0473	0,0494	4,4	0,0124		0,0141	14,0		0,0059			0,0031
13				0,0566	0,0587	3,6			0,0166		0,0068	0,0070	2,1		0,0036
14				0,0671	0,0688	2,5	0,0171		0,0194	13,5		0,0081		0,0034	0,0042
15				0,0788	0,0799	1,4			0,0223		0,0089	0,0093	3,9		0,0048
16				0,0920	0,0921	0,1	0,0226		0,0255	12,9		0,0106			0,0055
17				0,1068	0,1055	1,2			0,0289		0,0114	0,0120	5,3		0,0062
18				0,1235	0,1202	2,7	0,0289		0,0325	12,3		0,0135		0,0056	0,0069
19				0,1423	0,1363	4,2			0,0364		0,0141	0,0150	6,4		0,0077
20				0,1635	0,1541	5,8	0,0363		0,0405	11,6		0,0167			0,0086
21				0,1876	0,1736	7,5			0,0449		0,0172	0,0185	7,2		0,0095
22				0,2151	0,1953	9,2	0,0447		0,0496	10,8		0,0203		0,0085	0,0104
23				0,2466	0,2195	11,0			0,0545		0,0207	0,0223	7,8		0,0111
24				0,2830	0,2467	12,8	0,0543		0,0597	9,9		0,0243			0,0125
25				0,3253	0,2778	14,6			0,0652		0,0245	0,0265	8,3		0,0136
26				0,3751	0,3140	16,3	0,0652		0,0711	9,0		0,0287		0,0119	0,0147
27				0,4343	0,3572	17,7			0,0772		0,0286	0,0311	8,6		0,0159
28				0,5058	0,4123	18,5	0,0775		0,0837	8,0		0,0336			0,0171
29				0,5935	0,4924	17,0			0,0906		0,0332	0,0362	8,9		0,0184
30							0,0914		0,0978	7,0		0,0388		0,0160	0,0198
31									0,1054		0,0382	0,0417	9,1		0,0211
32							0,1071		0,1135	5,9		0,0446			0,0226
33									0,1220		0,0436	0,0476	9,2		0,0241
34							0,1249		0,1310	4,8		0,0508		0,0208	0,0257
35									0,1405		0,0495	0,0541	9,3		0,0273
36							0,1452		0,1506	3,7		0,0575			0,0289
37									0,1613		0,0559	0,0611	9,3		0,0307
38							0,1683		0,1726	2,6		0,0648		0,0263	0,0325
39									0,1848		0,0628	0,0687	9,3		0,0343
40							0,1947		0,1977	1,5		0,0727			0,0362
41									0,2116		0,0703	0,0768	9,3		0,0382
42							0,2252		0,2266	0,6		0,0812		0,0325	0,0403
43									0,2429		0,0784	0,0857	9,2		0,0424
44							0,2605		0,2606	0,0		0,0903			0,0446
45									0,2801		0,0872	0,0952	9,2		0,0468
46							0,3018		0,3019	0,0		0,1003		0,0396	0,0491
47									0,3266		0,0967	0,1055	9,2		0,0515
48							0,3505		0,3554	1,4		0,1110			0,0540
49									0,3905		0,1070	0,1168	9,2		0,0566
50							0,4088		0,4375	7,0		0,1227		0,0476	0,0592
51									0,5320		0,1181	0,1290	9,2		0,0619

LAMPIRAN G

Source Code

1. Netlist Desain 1

```

use("std2cvt.net")

pi = 3.1415926535897932385
poly = material {
  Poisson = 0.42,
  thermcond = 1.5,
  viscosity = 1.81e-5,
  fluid = 2e-6,
  density = 2300,
  Youngsmodulus = 160e9,
  permittivity = 8.854e-12,
  sheetresistance = 20,
  stress = 0,
  straingradient = 0,
  thermalexpansion = 29,
  ambienttemperature = 0
}

p1 = material {
  parent = poly,
  h = 2e-6,
  Poisson = 0.42,
  thermcond = 1.5,
  viscosity = 1.81e-5,
  fluid = 2e-6,
  density = 2300,
  Youngsmodulus = 160e9,
  permittivity = 8.854e-12,
  sheetresistance = 20,
  stress = 0,
  straingradient = 0,
  thermalexpansion = 29,
  ambienttemperature = 0
}

p2 = material {
  parent = poly,
  h = 1.5e-6,
  Poisson = 0.42,
  thermcond = 2.33,
  viscosity = 1.81e-5,
  fluid = 2e-6,
  density = 2300,
  Youngsmodulus = 160e9,
  permittivity = 8.854e-12,
  sheetresistance = 20,
  stress = 0,
  straingradient = 0,
  thermalexpansion = 29,
  ambienttemperature = 0
}

```



```

d2 = material {
  parent = poly,
  fluid = 0.75e-6,
  Poisson = 0.42,
  thermcond = 1.5,
  viscosity = 1.81e-5,
  fluid = 2e-6,
  density = 2300,
  Youngsmodulus = 160e9,
  permittivity = 8.854e-12,
  sheetresistance = 20,
  stress = 0,
  straingradient = 0,
  thermalexpansion = 29,
  ambienttemperature = 0
}

subnet mfbeam2de (a, b, material, l, w, h, R, G, resistivity,
density, fluid, viscosity, Youngsmodulus)
  local parent = material
  _currnodes["a"] = a
  _currnodes["b"] = b
  l = l or (material and material.l)
  w = w or (material and material.w)
  h = h or (material and material.h)
  R = R or (material and material.R)
  G = G or (material and material.G)
  resistivity = resistivity or (material and material.resistivity)
  density = density or (material and material.density)
  fluid = fluid or (material and material.fluid)
  viscosity = viscosity or (material and material.viscosity)
  Youngsmodulus = Youngsmodulus or (material and
material.Youngsmodulus)
  assert(((isdef(R)) or (isdef(G))) or (isdef(resistivity))), "R, G,
or resistivity must be defined in beam2de")
  if isdef(R) then
    mFR {_n("a"), _n("b"); material = parent, R = R} else
    if isdef(G) then
      mFR {_n("a"), _n("b"); material = parent, G = G} else
      if (((isdef(resistivity)) and (isdef(l))) and (isdef(w)))
and (isdef(h)) then
        mFR {_n("a"), _n("b"); material = parent, R =
((resistivity)*(l))/((w)*(h))} else
        assert(0, "R, G, or resistivity must be defined")
      end
    end
  end
  mfbeam2d {_n("a"), _n("b"); material = parent, l = l, w = w, h =
h, density = density, viscosity = viscosity, Youngsmodulus =
Youngsmodulus}
end

subnet mfbeam3de (a, b, material, l, w, h, R, G, resistivity,
density, fluid, viscosity, Youngsmodulus)
  local parent = material
  _currnodes["a"] = a

```

```

_currnodes["b"] = b
l = l or (material and material.l)
w = w or (material and material.w)
h = h or (material and material.h)
R = R or (material and material.R)
G = G or (material and material.G)
resistivity = resistivity or (material and material.resistivity)
density = density or (material and material.density)
fluid = fluid or (material and material.fluid)
viscosity = viscosity or (material and material.viscosity)
Youngsmodulus = Youngsmodulus or (material and
material.Youngsmodulus)
if isdef(R) then
    mFR {_n("a"), _n("b"); material = parent, R = R} else
    if isdef(G) then
        mFR {_n("a"), _n("b"); material = parent, G = G} else
        if (((isdef(resistivity)) and (isdef(l))) and (isdef(w)))
and (isdef(h)) then
            mFR {_n("a"), _n("b"); material = parent, R =
((resistivity)*(l))/((w)*(h))} else
            assert(0, "R, G, or resistivity must be defined")
        end
    end
end
end
mfbeam3d {_n("a"), _n("b"); material = parent, l = l, w = w, h =
h, density = density, viscosity = viscosity, Youngsmodulus =
Youngsmodulus}
end

subnet mfgap2de (a, b, c, d, material, l, w, w1, w2, h, R, R1, R2,
G, G1, G2, resistivity, density, fluid, viscosity, Youngsmodulus,
gap, permittivity)
    local parent = material
    _currnodes["a"] = a
    _currnodes["b"] = b
    _currnodes["c"] = c
    _currnodes["d"] = d
    l = l or (material and material.l)
    w = w or (material and material.w)
    w1 = w1 or (material and material.w1)
    w2 = w2 or (material and material.w2)
    h = h or (material and material.h)
    R = R or (material and material.R)
    R1 = R1 or (material and material.R1)
    R2 = R2 or (material and material.R2)
    G = G or (material and material.G)
    G1 = G1 or (material and material.G1)
    G2 = G2 or (material and material.G2)
    resistivity = resistivity or (material and material.resistivity)
    density = density or (material and material.density)
    fluid = fluid or (material and material.fluid)
    viscosity = viscosity or (material and material.viscosity)
    Youngsmodulus = Youngsmodulus or (material and
material.Youngsmodulus)
    gap = gap or (material and material.gap)
    permittivity = permittivity or (material and
material.permittivity)

```

```

assert((isdef(w)) or ((isdef(w1)) and (isdef(w2))), "Must define
beam widths")
assert((((isdef(resistivity)) or (isdef(R))) or (isdef(G))) or
((((isdef(R1)) or (isdef(G1))) and (isdef(R2))) or (isdef(G2))),
"Must define beam resistivities")
local w1 = ((isdef(w1)) and (w1) or (w))
local w2 = ((isdef(w2)) and (w2) or (w))
local R1 = ((isdef(R1)) and (R1) or (R))
local R2 = ((isdef(R2)) and (R2) or (R))
local G1 = ((isdef(G1)) and (G1) or (G))
local G2 = ((isdef(G2)) and (G2) or (G))
local R1 = (((isdef(R1)) or (isdef(G1))) and (R1) or
((resistivity)*(l))/((w1)*(h)))
local R2 = (((isdef(R2)) or (isdef(G2))) and (R2) or
((resistivity)*(l))/((w2)*(h)))
mfbem2de {_n("a"), _n("b"); material = parent, l = l, w = w1, h
= h, density = density, fluid = fluid, viscosity = viscosity,
Youngsmodulus = Youngsmodulus, R = R1, G = G1}
mfbem2de {_n("c"), _n("d"); material = parent, l = l, w = w2, h
= h, density = density, fluid = fluid, viscosity = viscosity,
Youngsmodulus = Youngsmodulus, R = R1, G = G1}
mfgap2dforce {_n("a"), _n("b"), _n("c"), _n("d"); material =
parent, l = l, w1 = w1, w2 = w2, gap = gap, permittivity =
permittivity}
end

subnet mfgap3de (a, b, c, d, material, l, w, w1, w2, h, R, R1, R2,
G, G1, G2, resistivity, density, fluid, viscosity, Youngsmodulus,
gap, permittivity)
local parent = material
_currnodes["a"] = a
_currnodes["b"] = b
_currnodes["c"] = c
_currnodes["d"] = d
l = l or (material and material.l)
w = w or (material and material.w)
w1 = w1 or (material and material.w1)
w2 = w2 or (material and material.w2)
h = h or (material and material.h)
R = R or (material and material.R)
R1 = R1 or (material and material.R1)
R2 = R2 or (material and material.R2)
G = G or (material and material.G)
G1 = G1 or (material and material.G1)
G2 = G2 or (material and material.G2)
resistivity = resistivity or (material and material.resistivity)
density = density or (material and material.density)
fluid = fluid or (material and material.fluid)
viscosity = viscosity or (material and material.viscosity)
Youngsmodulus = Youngsmodulus or (material and
material.Youngsmodulus)
gap = gap or (material and material.gap)
permittivity = permittivity or (material and
material.permittivity)
assert((isdef(w)) or ((isdef(w1)) and (isdef(w2))), "Must define
beam widths")

```

```

assert((((isdef(resistivity)) or (isdef(R))) or (isdef(G))) or
((((isdef(R1)) or (isdef(G1))) and (isdef(R2))) or (isdef(G2))),
"Must define beam resistivities")
  local w1 = ((isdef(w1)) and (w1) or (w))
  local w2 = ((isdef(w2)) and (w2) or (w))
  local R1 = ((isdef(R1)) and (R1) or (R))
  local R2 = ((isdef(R2)) and (R2) or (R))
  local G1 = ((isdef(G1)) and (G1) or (G))
  local G2 = ((isdef(G2)) and (G2) or (G))
  local R1 = (((isdef(R1)) or (isdef(G1))) and (R1) or
  ((resistivity)*(l))/((w1)*(h)))
  local R2 = (((isdef(R2)) or (isdef(G2))) and (R2) or
  ((resistivity)*(l))/((w2)*(h)))
  mfbem3de {_n("a"), _n("b"); material = parent, l = l, w = w1, h
= h, density = density, fluid = fluid, viscosity = viscosity,
Youngsmodulus = Youngsmodulus, R = R1, G = G1}
  mfbem3de {_n("c"), _n("d"); material = parent, l = l, w = w2, h
= h, density = density, fluid = fluid, viscosity = viscosity,
Youngsmodulus = Youngsmodulus, R = R1, G = G1}
  mfgap3dforce {_n("a"), _n("b"), _n("c"), _n("d"); material =
parent, l = l, w1 = w1, w2 = w2, gap = gap, permittivity =
permittivity}
end

subnet mfgap2dV (a, b, c, d, material, l, w, w1, w2, R, R1, R2, G,
G1, G2, resistivity, density, fluid, viscosity, Youngsmodulus,
gap, permittivity, V)
  local parent = material
  _currnodes["a"] = a
  _currnodes["b"] = b
  _currnodes["c"] = c
  _currnodes["d"] = d
  l = l or (material and material.l)
  w = w or (material and material.w)
  w1 = w1 or (material and material.w1)
  w2 = w2 or (material and material.w2)
  R = R or (material and material.R)
  R1 = R1 or (material and material.R1)
  R2 = R2 or (material and material.R2)
  G = G or (material and material.G)
  G1 = G1 or (material and material.G1)
  G2 = G2 or (material and material.G2)
  resistivity = resistivity or (material and material.resistivity)
  density = density or (material and material.density)
  fluid = fluid or (material and material.fluid)
  viscosity = viscosity or (material and material.viscosity)
  Youngsmodulus = Youngsmodulus or (material and
material.Youngsmodulus)
  gap = gap or (material and material.gap)
  permittivity = permittivity or (material and
material.permittivity)
  V = V or (material and material.V)
  mfgap2dV {_n("a"), _n("b"), _n("c"), _n("d"); material = parent,
l = l, w = w, w1 = w1, w2 = w2, R = R, R1 = R1, R2 = R2, G = G, G1
= G1, G2 = G2, resistivity = resistivity, density = density, fluid
= fluid, viscosity = viscosity, Youngsmodulus = Youngsmodulus, gap
= gap, permittivity = permittivity}
  mfVsrc {_n("d"), _n("b"); V = V}

```

```

mfeground {_n("b"); }
end

subnet mfgap3dV (a, b, c, d, material, l, w, w1, w2, R, R1, R2, G,
G1, G2, resistivity, density, fluid, viscosity, Youngsmodulus,
gap, permittivity, V)
  local parent = material
  _currnodes["a"] = a
  _currnodes["b"] = b
  _currnodes["c"] = c
  _currnodes["d"] = d
  l = l or (material and material.l)
  w = w or (material and material.w)
  w1 = w1 or (material and material.w1)
  w2 = w2 or (material and material.w2)
  R = R or (material and material.R)
  R1 = R1 or (material and material.R1)
  R2 = R2 or (material and material.R2)
  G = G or (material and material.G)
  G1 = G1 or (material and material.G1)
  G2 = G2 or (material and material.G2)
  resistivity = resistivity or (material and material.resistivity)
  density = density or (material and material.density)
  fluid = fluid or (material and material.fluid)
  viscosity = viscosity or (material and material.viscosity)
  Youngsmodulus = Youngsmodulus or (material and
material.Youngsmodulus)
  gap = gap or (material and material.gap)
  permittivity = permittivity or (material and
material.permittivity)
  V = V or (material and material.V)
  mfgap3dV {_n("a"), _n("b"), _n("c"), _n("d"); material = parent,
l = l, w = w, w1 = w1, w2 = w2, R = R, R1 = R1, R2 = R2, G = G, G1
= G1, G2 = G2, resistivity = resistivity, density = density, fluid
= fluid, viscosity = viscosity, Youngsmodulus = Youngsmodulus, gap
= gap, permittivity = permittivity}
  mfVsrc {_n("d"), _n("b"); V = V}
  mfeground {_n("b"); }
end

```

```

-----
===== Tether 1 (Done) =====
-----

```

```

mfeground {_n("A"); }
mfeground {_n("B"); }
  mfanchor {_n("A"); material = p1, l = 1u, w = 1u, h = 30u, oz =
-(deg(90)), R=1}

```

```

mfanchor {_n("B"); material = p1, l = 1u, w = 1u, h = 30u, oz =
deg(90), R=1}
mfbeam3de {_n("A"), _n("z1"); material = p1, l = 100.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(90), R=1}
mfbeam3de {_n("z1"), _n("z2"); material = p1, l = 4u, w = 1u, h
= 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("z1"), _n("z3"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(180), R=1}
mfbeam3de {_n("z2"), _n("z4"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u,
h = 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("z2"), _n("z5"); material = p1, l = 114.5u, w =
1u, h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}
mfbeam3de {_n("z5"), _n("z6"); material = p1, l = 114.5u, w =
1u, h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}
mfbeam3de {_n("z6"), _n("z7"); material = p1, l = 4u, w = 1u, h
= 30u, oz = deg(180), R=1}
mfbeam3de {_n("z7"), _n("z8"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(180), R=1}
mfbeam3de {_n("z6"), _n("z9"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u,
h = 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("z7"), _n("B"); material = p1, l = 100.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(90), R=1}

mfbeam3de {_n("z5"), _n("y1"); material = p1, l = 1.5u, w = 28u,
h = 30u, oz = deg(180), R=1}
mfbeam3de {_n("z5"), _n("y2"); material = p1, l = 2.5u, w = 28u,
h = 30u, R=1}

```

```

-----
===== Beam (Done) =====
-----

```

```

mfVsrc {_n("a8"), _n("f"); V = 15}
mfeground {_n("f"); }
mfVsrc {_n("a15"), _n("g"); V = 15}
mfeground {_n("g"); }
mfVsrc {_n("c8"), _n("h"); V = 15}
mfeground {_n("h"); }
mfVsrc {_n("c15"), _n("i"); V = 15}
mfeground {_n("i"); }
mfVsrc {_n("f8"), _n("j"); V = 15}
mfeground {_n("j"); }
mfVsrc {_n("f15"), _n("k"); V = 15}
mfeground {_n("k"); }
mfVsrc {_n("i8"), _n("l"); V = 15}
mfeground {_n("l"); }
mfVsrc {_n("i15"), _n("m"); V = 15}
mfeground {_n("m"); }
mfVsrc {_n("l8"), _n("n"); V = 15}
mfeground {_n("n"); }
mfVsrc {_n("l15"), _n("o"); V = 15}
mfeground {_n("o"); }

```

```

=====

```

```

mfanchor {_n("a8"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
R=1}
mfanchor {_n("a8"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u, h = 30u, oz
= deg(180), R=1}
mfanchor {_n("a15"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
R=1}
mfanchor {_n("a15"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u, h = 30u,
oz = deg(180), R=1}
mfanchor {_n("c8"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
R=1}
mfanchor {_n("c8"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u, oz
= deg(180), R=1}
mfanchor {_n("c15"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
R=1}
mfanchor {_n("c15"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
oz = deg(180), R=1}
mfanchor {_n("f8"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
R=1}
mfanchor {_n("f8"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u, oz
= deg(180), R=1}
mfanchor {_n("f15"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
R=1}
mfanchor {_n("f15"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
oz = deg(180), R=1}
mfanchor {_n("i8"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
R=1}
mfanchor {_n("i8"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u, oz
= deg(180), R=1}
mfanchor {_n("i15"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
R=1}
mfanchor {_n("i15"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
oz = deg(180), R=1}
mfanchor {_n("l8"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u, h = 30u,
R=1}
mfanchor {_n("l8"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u, oz
= deg(180), R=1}
mfanchor {_n("l15"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u, h = 30u}
mfanchor {_n("l15"); material = p1, l = 3.5u, w = 1u, h = 30u,
oz = deg(180), R=1}

-----

mfbem3de {_n("y2"), _n("a1"); material = p1, l = 0.5u, w = 28u,
h = 30u, R=1}
mfbem3de {_n("a1"), _n("a10"); material = p1, l = 6.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
mfbem3de {_n("a1"), _n("a2"); material = p1, l = 15u, w = 1u, h
= 30u, oz = deg(90), R=1}
mfgap2de {_n("a6"), _n("a5"), _n("a4"), _n("a2"); material = p1,
l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1, R2=1}
mfbem3de {_n("a6"), _n("a8"); material = p1, l = 1.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(90), R=1}

--

mfbem3de {_n("a1"), _n("a11"); material = p1, l = 15u, w = 1u,
h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}

```

```

    mfgap2de {_n("a13"), _n("a14"), _n("a11"), _n("a12"); material =
p1, l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1,
R2=1}
    mfbeam3de {_n("a14"), _n("a15"); material = p1, l = 1.5u, w =
1u, h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}

--
--
    mfbeam3de {_n("a10"), _n("c1"); material = p1, l = 0.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
    mfbeam3de {_n("c1"), _n("c10"); material = p1, l = 6.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
    mfbeam3de {_n("c1"), _n("c2"); material = p1, l = 15u, w = 1u, h
= 30u, oz = deg(90), R=1}
    mfgap2de {_n("c6"), _n("c5"), _n("c4"), _n("c2"); material = p1,
l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1, R2=1}
    mfbeam3de {_n("c6"), _n("c8"); material = p1, l = 1.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(90), R=1}

--
--
    mfbeam3de {_n("c1"), _n("c11"); material = p1, l = 15u, w = 1u,
h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}
    mfgap2de {_n("c13"), _n("c14"), _n("c11"), _n("c12"); material =
p1, l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1,
R2=1}
    mfbeam3de {_n("c14"), _n("c15"); material = p1, l = 1.5u, w =
1u, h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}

--
--
    mfbeam3de {_n("c10"), _n("f1"); material = p1, l = 0.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
    mfbeam3de {_n("f1"), _n("f10"); material = p1, l = 6.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
    mfbeam3de {_n("f1"), _n("f2"); material = p1, l = 15u, w = 1u, h
= 30u, oz = deg(90), R=1}
    mfgap2de {_n("f6"), _n("f5"), _n("f4"), _n("f2"); material = p1,
l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1, R2=1}
    mfbeam3de {_n("f6"), _n("f8"); material = p1, l = 1.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(90), R=1}

--
--
    mfbeam3de {_n("f1"), _n("f11"); material = p1, l = 15u, w = 1u,
h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}
    mfgap2de {_n("f13"), _n("f14"), _n("f11"), _n("f12"); material =
p1, l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1,
R2=1}
    mfbeam3de {_n("f14"), _n("f15"); material = p1, l = 1.5u, w =
1u, h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}

--
--
    mfbeam3de {_n("f10"), _n("i1"); material = p1, l = 0.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
    mfbeam3de {_n("i1"), _n("i10"); material = p1, l = 6.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
    mfbeam3de {_n("i1"), _n("i2"); material = p1, l = 15u, w = 1u, h
= 30u, oz = deg(90), R=1}
    mfgap2de {_n("i6"), _n("i5"), _n("i4"), _n("i2"); material = p1,
l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1, R2=1}
    mfbeam3de {_n("i6"), _n("i8"); material = p1, l = 1.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(90), R=1}

--

```



```

mfbeam3de {_n("i1"), _n("i11"); material = p1, l = 15u, w = 1u,
h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}
mfgap2de {_n("i13"), _n("i14"), _n("i11"), _n("i12"); material =
p1, l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1,
R2=1}
mfbeam3de {_n("i14"), _n("i15"); material = p1, l = 1.5u, w =
1u, h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}
--
--
mfbeam3de {_n("i10"), _n("l1"); material = p1, l = 0.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("l1"), _n("l10"); material = p1, l = 3.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("l1"), _n("l2"); material = p1, l = 15u, w = 1u, h
= 30u, oz = deg(90), R=1}
mfgap2de {_n("l6"), _n("l5"), _n("l4"), _n("l2"); material = p1,
l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1, R2=1}
mfbeam3de {_n("l6"), _n("l8"); material = p1, l = 1.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(90), R=1}
--
mfbeam3de {_n("l1"), _n("l11"); material = p1, l = 15u, w = 1u,
h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}
mfgap2de {_n("l13"), _n("l14"), _n("l11"), _n("l12"); material =
p1, l=49u, w1=1u, w2=1u, h = 30u, gap=2u, oz=-(deg(90)), R1=1,
R2=1}
mfbeam3de {_n("l14"), _n("l15"); material = p1, l = 1.5u, w =
1u, h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}

-----
----- Tether 2 (Done) -----
-----

mfeground {_n("x8"); }
mfeground {_n("C"); }
mfbeam3de {_n("l10"), _n("x2"); material = p1, l = 2.5u, w =
28u, h = 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("x2"), _n("x3"); material = p1, l = 1.5u, w = 28u,
h = 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("x2"), _n("x4"); material = p1, l = 114.5u, w =
1u, h = 30u, oz = deg(90), R=1}
mfbeam3de {_n("x4"), _n("x5"); material = p1, l = 4u, w = 1u, h
= 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("x4"), _n("x6"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(180), R=1}
mfbeam3de {_n("x5"), _n("x7"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u,
h = 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("x5"), _n("x8"); material = p1, l = 100.5u, w =
1u, h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}
mfbeam3de {_n("x9"), _n("C"); material = p1, l = 100.5u, w = 1u,
h = 30u, oz = deg(90), R=1}
mfbeam3de {_n("x10"), _n("x9"); material = p1, l = 4u, w = 1u, h
= 30u, R=1}
mfbeam3de {_n("x9"), _n("x11"); material = p1, l = 0.5u, w = 1u,
h = 30u, R=1}

```

```

mfbeam3de {_n("x10"), _n("x12"); material = p1, l = 0.5u, w =
1u, h = 30u, oz = deg(180), R=1}
mfbeam3de {_n("x2"), _n("x10"); material = p1, l = 114.5u, w =
1u, h = 30u, oz = -(deg(90)), R=1}

mfanchor {_n("x8"); material = p1, l = 1u, w = 1u, h = 30u, oz =
-(deg(90)), R=1}
mfanchor {_n("C"); material = p1, l = 1u, w = 1u, h = 30u, oz =
deg(90), R=1}

relpos_treewalk()

```

2. M. File untuk menjalankan analisis DC

```

echo off

echo on; clc

pause
type desain1.net
pause
type mumps20.net
pause

net = cho_load('desain1.net');

figure;
cho_display(net);

pause % Strike any key to continue
clc

% Static Analysis%

pause % Strike any key to analyze and display deflection at 10V

[dq] = cho_dc(net);
figure;
cho_display(net,dq);
title('Deflected structure at V=10v');

y(1) = dqval(net,dq,'z3','x')
y(1) = dqval(net,dq,'a4','x')
y(1) = dqval(net,dq,'f2','x')
y(1) = dqval(net,dq,'i10','x')

y(1) = dqval(net,dq,'a5','x')
pause % Strike any key to exit
echo off
disp('End of demo')

```