

**UNIVERSITAS INDONESIA**

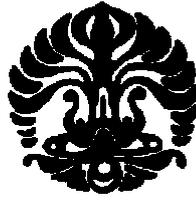
**PERANCANGAN MEMS ELEKTRODA UNTUK SENSOR  
DIELEKTROMETIK SPEKTRAL MOLEKULER DENGAN  
FREKUENSI MEKANIS 30KHz**

**SKRIPSI**

**YEDIAEL CHRISTIAN**

**0706268096**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERANCANGAN MEMS ELEKTRODA UNTUK SENSOR  
DIELEKTROMETIK SPEKTRAL MOLEKULER DENGAN  
FREKUENSI MEKANIS 30KHz**

**SKRIPSI**

**YEDIAEL CHRISTIAN**

**0706268096**

**Diajukan sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama** : Yediael Christian

**NPM** : 0706268096

**Tanda Tangan** : 

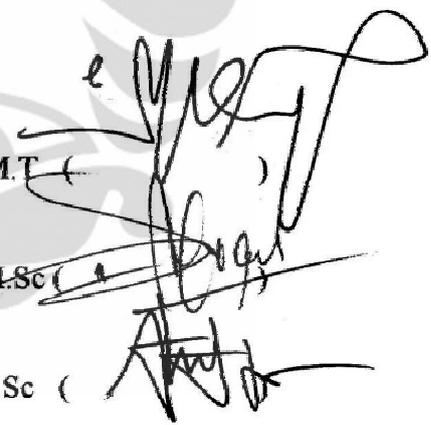
**Tanggal** : 14 Juni 2011

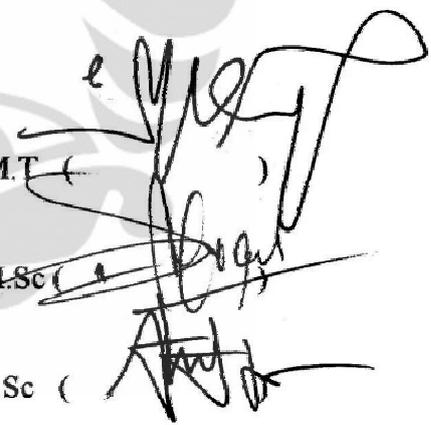
## HALAMAN PENGESAHAN

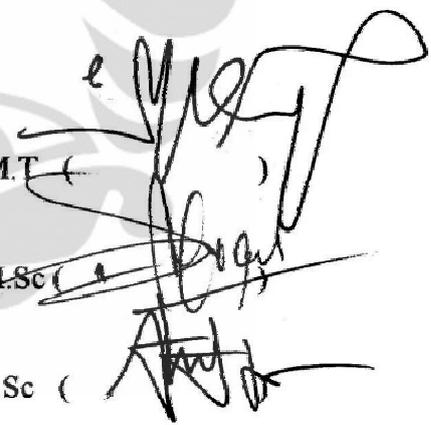
Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Yediael Christian  
NPM : 0706268096  
Prigram Studi : Elektro  
Judul Skripsi : Perancangan MEMS Elektroda untuk Sensor Dielektrometrik Spektral Molekuler dengan Frekuensi Mekanis 30 KHz

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, M.T (  )

Penguji : Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, M.Sc (  )

Penguji : Prof. Dr. Ir. Harry Sudiby, M.Sc (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis tujukan pertama-tama kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan rahmat-Nya yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro, Kekhususan Teknik Elektronika, pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik tanpa bantuan beberapa pihak, baik secara teknis maupun moral. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Agus Santoso Tamsir, M.T, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu dan memberikan pengetahuannya untuk memberi pengarahan, diskusi, bimbingan, motivasi, serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan oleh penulis dengan baik.
2. Keluarga, teman-teman satu angkatan Teknik Elektro UI 2007, teman-teman Persekutuan Oikumene Fakultas Teknik Universitas Indonesia (POFTUI), dan rekan sepenelitian MEMS, Nyssa Adi. Penulis ucapkan terika kasih atas doa dan motivasi yang telah diberikan.
3. Para peneliti sebelumnya yang telah memberikan kepada penulis sumber literatur untuk penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi yang telah dihasilkan ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis selalu membuka diri untuk menerima kritik dan saran dari para pembaca untuk dapat memperbaiki diri ke depannya dan untuk bisa mengantar penelitian MEMS ini ke arah yang lebih maju lagi. Akhir kata, semoga Tuhan membalas kebaikan pihak-pihak yang membantu penyelesaian skripsi ini, baik yang berupa bantuan teknis maupun moral, dan penulis juga berharap agar skripsi ini bisa bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 14 Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : Yediael Christian  
NPM : 0706268096  
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 Royalti Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**PERANCANGAN MEMS ELEKTRODA UNTUK SENSOR  
DIELEKTROMETIK SPEKTRAL MOLEKULER DENGAN FREKUENSI  
MEKANIS 30KHz**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 14 Juni 2011  
Yang menyatakan



**Yediael Christian**

## ABSTRAK

Nama : Yediael Christian  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Perancangan MEMS Elektroda untuk Sensor Dielektrometik  
Spektral Molekuler dengan Frekuensi Mekanis 30KHz

Sensor spektral molekuler merupakan sensor menggunakan kaidah elektroda bergerak (MEMS) sebagai elektroda pengukur kapasitansi dari bahan-bahan di atasnya (menggunakan konsep FEF). FEF adalah *Fringing Electric Field*. Dalam skripsi ini, dibuat rancang bangun sederhana dengan menghitung satu bagian elektroda bergerak tersebut. Contoh perhitungan dan contoh simulasi dari salah satu bagian terkecil elektroda bergerak sensor tersebut. Contoh perhitungan dan simulasi tersebut meliputi konstanta pegas (berat dari bandul (*proofmass*)) dan koefisien *damping*. Selanjutnya juga dihitung frekuensi resonansi mekanis dari elektroda tersebut.

Kata kunci : MEMS, Elektroda getar, Sensor Spektral Molekuler

## ABSTRACT

Name : Yediael Christian  
Major : Electrical Engineering  
Title : Design of MEMS Sensor Electrodes Molecular Spectral Dielectrometric with Mechanical Frequency 30kHz

Molecular spectral sensor is a sensor electrode using a rule to move (MEMS) as the measuring electrode capacitance of the materials on it (using the concept of FEF). FEF is a fringing Electric Field. In this minithesis, simple design made by calculating a moving part of the electrode. Example of calculation and simulation example of one of the smallest electrode is moving sensors. Examples include the calculation and simulation of spring constant (the weight of the pendulum (proof mass)) and damping coefficient. Furthermore, it also calculated the mechanical resonance frequency of these electrodes.

Keyword : MEMS, Vibrate Electrode, Molecular Spectral Sensor

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xiii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan .....	3
1.3 Pembatasan Masalah.....	3
1.4 Metodologi Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB 2 DASAR TEORI</b> .....	<b>6</b>
2.1 MEMS.....	6
2.2 Sensor MEMS Kapasitif.....	9
2.2.1 Teori Elektrostatik.....	11
2.2.2 Pull-in Voltage .....	14
2.3 Persamaan Mekanika Umum MEMS .....	18
2.3.1 Konstanta Pegas .....	23
2.3.1.1 Straight Truss Design .....	28
2.3.2 Koefisien Damping .....	30
2.3.2.1 Squeeze Film Damping .....	31
2.3.2.2 Viscous Drag Damping .....	35
<b>BAB 3 PERANCANGAN SENSOR MEMS KAPASITIF</b> .....	<b>37</b>
3.1 Tujuan Perancangan.....	37
3.2 Intellisuite .....	38
3.3 Rancang Bangun Sistem MEMS Kapasitif.....	43
3.3.1 Proofmass.....	43
3.3.2 Sirip.....	47

3.3.3 Spring.....	48
3.3.4 Fixed Structure.....	49
3.3.5 Anchor.....	49
<b>BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS.....</b>	<b>52</b>
4.1 Pengaruh Dimensi Spring Terhadap Nilai Konstanta Pegas .....	52
4.1.1 Lebar Spring Tengah Sebesar 2 mikrometer.....	52
4.1.2 Lebar Spring Tengah Sebesar 4 mikrometer.....	54
4.1.3 Lebar Spring Tengah Sebesar 6 mikrometer.....	56
4.1.4 Lebar Spring Tengah Sebesar 8 mikrometer.....	58
4.2 Pengaruh Dimensi Spring Terhadap Frekuensi Resonansi Mekanis .....	63
4.2.1 Lebar Spring Tengah Sebesar 2 mikrometer.....	64
4.2.2 Lebar Spring Tengah Sebesar 4 mikrometer.....	65
4.2.3 Lebar Spring Tengah Sebesar 6 mikrometer.....	67
4.2.4 Lebar Spring Tengah Sebesar 8 mikrometer.....	69
4.3 Desain Akhir Perancangan MEMS.....	74
4.3.1 Perhitungan Konstanta Pegas.....	76
4.3.2 Perhitungan Koefisien Damping.....	77
4.4 Pengaruh Nilai Tegangan Terhadap Pergeseran Sirip.....	78
4.5 Analisis Sagging.....	81
<b>BAB 5 KESIMPULAN.....</b>	<b>86</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>87</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta persebaran aplikasi MEMS [2].	7
Gambar 2.2 Struktur sensor MEMS kapasitif dengan.	10
Gambar 2.3 Ilustrasi FEF.	10
Gambar 2.4 Dua tipe pergerakan satu plat elektroda relatif terhadap yang lain: (a) pergerakan tegak lurus dan (b) pergerakan paralel [4].	12
Gambar 2.5 Ilustrasi gaya yang menyebabkan perubahan kapasitansi pada sensor kapasitif: (a) pada pergerakan yang tegak lurus dan (b) pada pergerakan yang paralel [4].	13
Gambar 2.6 Ilustrasi gaya elektrostatik di antara dua plat yang diberi beda tegangan.	14
Gambar 2.7 Jalur pengintegralan persamaan (2.10).	15
Gambar 2.8 Skematik aktuator [7].	17
Gambar 2.9 Skema plat yang dihubungkan dengan sistem pegas [6].	22
Gambar 2.10 Sistem pegas dengan sebuah beban [1].	23
Gambar 2.11 Spring pada ujung struktur MEMS.	24
Gambar 2.12 Spring pada ujung dan tengah struktur MEMS.	25
Gambar 2.13 Konfigurasi dari spring MEMS (a) <i>cantilever</i> , (b) <i>bridge</i> , (c) <i>two-point torsional beams</i> [4].	26
Gambar 2.14 Konfigurasi spring dan nilai $\beta$ dari masing-masing konfigurasi [4].	26
Gambar 2.15 <i>Beam</i> dan <i>truss</i> pada spring MEMS.	27
Gambar 2.16 (a) <i>rigid truss</i> , (b) <i>non-rigid straight truss</i> , dan	27
Gambar 2.17 Analisis per-bagian dari <i>straight truss design</i> [4].	28
Gambar 2.18 Representasi dari koefisien damping [1].	31
Gambar 2.19 <i>Squeeze damping</i> akibat perubahan jarak antarplat [4].	32
Gambar 2.20 Grafik $f(W/L)$ vs $W/L$ [4].	32
Gambar 2.21 Permukaan elektroda yang berpori yang bergerak secara vertikal [4].	33
Gambar 2.22 <i>Viscous drag damping</i> [4].	35
Gambar 3.1 Gambar rancang bangun utuh sensor (A) dan elektroda MEMS (B).	37
Gambar 3.2 Jendela 3DBuilder. Jendela dengan latar biru merupakan jendela tempat perancangan dalam 2D sementara jendela dengan latar hitam merupakan tempat <i>preview</i> dalam 3D.	40
Gambar 3.3 Jendela kerja ThermoElectroMechanical.	41
Gambar 3.4 Pilihan tipe simulasi pada ThermoElectroMechanical.	42
Gambar 3.5 Sensor MEMS kapasitif dengan <i>proofmass</i> berbentuk <i>fishbone</i> .	43
Gambar 3.6 Desain <i>proofmass</i> yang berpori.	44
Gambar 3.7 Gambar 3.6 <i>Neck</i> .	46
Gambar 3.8 Spring yang mengenai sirip saat MEMS berosilasi akibat ukuran lebar <i>neck</i> yang terlalu kecil.	46
Gambar 3.9 <i>Waist</i> .	47
Gambar 3.10 Sirip pada <i>proofmass</i> tipe <i>fish bone</i> .	48
Gambar 3.11 Posisi spring pada struktur MEMS.	49

Gambar 3.12 Penampang samping MEMS di atas substrat wafer [2].....	49
Gambar 4.1 Grafik konstanta pegas vs lebar <i>spring</i> ujung saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 2 mikrometer.....	54
Gambar 4.2 Grafik konstanta pegas vs lebar <i>spring</i> ujung saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 4 mikrometer.....	56
Gambar 4.3 Grafik konstanta pegas vs lebar <i>spring</i> ujung saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 6 mikrometer.....	58
Gambar 4.4 Grafik konstanta pegas vs lebar <i>spring</i> ujung saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 8 mikrometer.....	60
Gambar 4.5 Grafik lengkap konstanta pegas vs dimensi <i>spring</i> .....	61
Gambar 4.6 Keterangan gambar 4.5.....	61
Gambar 4.7 Grafik frekuensi vs lebar <i>spring</i> ujung saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 2 mikrometer.....	65
Gambar 4.8 Grafik frekuensi vs lebar <i>spring</i> ujung saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 4 mikrometer.....	67
Gambar 4.9 Grafik frekuensi vs lebar <i>spring</i> ujung saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 6 mikrometer.....	69
Gambar 4.10 Grafik frekuensi vs lebar <i>spring</i> ujung saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 8 mikrometer.....	71
Gambar 4.11 Grafik lengkap frekuensi vs dimensi <i>spring</i> .....	71
Gambar 4.12 Keterangan gambar 4.11.....	72
Gambar 4.13 Desain Akhir MEMS.....	76
Gambar 4.14 Hubungan pergeseran plat elektroda MEMS dengan beda tegangan.....	81
Gambar 4.15 Penampang samping MEMS yang belum mengalami.....	82
Gambar 4.16 Penampang samping MEMS yang sudah mengalami .....	82
Gambar 4.17 Hasil simulasi <i>sagging</i> .....	84
Gambar 4.18 Pemilihan menu untuk mengikutsertakan fenomena <i>sagging</i> pada analisis frekuensi natural. ....	85

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel aplikasi MEMS dan nilai investasinya [3].	7
Tabel 4.1 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 450 mikrometer.	52
Tabel 4.2 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 300 mikrometer.	53
Tabel 4.3 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 150 mikrometer.	53
Tabel 4.4 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 450 mikrometer.	54
Tabel 4.5 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 300 mikrometer.	55
Tabel 4.6 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 150 mikrometer.	55
Tabel 4.7 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 450 mikrometer.	56
Tabel 4.8 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 300 mikrometer.	57
Tabel 4.9 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 150 mikrometer.	57
Tabel 4.10 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 450 mikrometer.	58
Tabel 4.11 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 300 mikrometer.	59
Tabel 4.12 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 150 mikrometer.	59
Tabel 4.13 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 450 mikrometer.	64
Tabel 4.14 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 300 mikrometer.	64

Tabel 4.15 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 150 mikrometer. ....	64
Tabel 4.16 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 450 mikrometer. ....	65
Tabel 0.17 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 300 mikrometer. ....	66
Tabel 4.18 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 150 mikrometer. ....	66
Tabel 4.19 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 450 mikrometer. ....	67
Tabel 4.20 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 300 mikrometer. ....	68
Tabel 4.21 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 150 mikrometer. ....	68
Tabel 4.22 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 450 mikrometer. ....	69
Tabel 4.23 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 300 mikrometer. ....	70
Tabel 4.24 Tabel pengaruh lebar <i>spring</i> ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar <i>spring</i> tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang <i>spring</i> ujung 150 mikrometer. ....	70
Tabel 4.25 Tabel spesifikasi akhir MEMS. ....	75
Tabel 4.26 Tabel Pengaruh tegangan terhadap pergesaran plat elektroda. ....	79

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Dalam sejarah hidupnya, manusia selalu berinovasi dengan tujuan untuk mempermudah dan meningkatkan kualitas hidupnya, baik berupa metode-metode maupun peralatan secara fisik. Inovasi ini juga tampak dalam bidang elektronika atau secara khusus mikroelektronika di mana terdapat kecenderungan untuk menghasilkan peralatan atau divais dengan dimensi yang sekecil mungkin namun dengan kinerja setinggi mungkin. Hal ini disebut juga mengintegrasikan suatu fungsi kerja dalam skala yang lebih kecil. Keuntungan dari penintegrasian ini selain memperkecil dimensi dari divais yang dihasilkan, energi yang diperlukan per satuan kerja dari divais tersebut juga akan lebih kecil. Performa dari divais yang dihasilkan juga akan meningkat dan biaya produksi yang tentu saja akan menurun.

Perkembangan ini tidak lepas dari pidato seorang peraih nobel di bidang fisika tahun 1965, Richard P. Feynman, yang berjudul “There’s Plenty of Room at the bottom” atau “Ada banyak ruangan di bagian bawah” (Feynman 1992, 1993) [1]. Dalam pidatonya tersebut, dia berbicara tentang masalah memanipulasi dan mengendalikan hal-hal dalam skala kecil. Lebih jauh, Feynman memberi contoh dalam sistem biologis yang sangat kecil seperti sel-sel.

Sejak saat itu, elemen-elemen elektronika seperti transistor, kapasitor, dan bahkan rangkaiannya secara keseluruhan selalu diusahakan untuk disusutkan ke ukuran yang lebih kecil sehingga hasilnya pada sekarang ini terdapat divais-divais seperti mikroprosesor yang berukuran tidak lebih besar dari uang logam namun memiliki puluhan juta transistor di dalamnya. Bukan cuma divais elektronik yang dikembangkan ke dalam bentuk yang lebih kecil namun juga divais-divais mekanik yang biasa disebut mesin mikro (*micro machine*). Pada perkembangan selanjutnya dikembangkan juga divais yang menggunakan dua prinsip listrik dan

mekanis ke dalam bentuk kecil atau mikro. Divais ini sering disebut MEMS atau *Micro Electro Mechanical System*.

Pada perkembangan selanjutnya, MEMS banyak diaplikasikan sebagai aktuator maupun sensor dan sudah dipakai secara luas di berbagai macam bidang seperti otomotif, medis, *aerospace*, analisis kimia, telekomunikasi (khususnya komunikasi nirkabel), dll. Luasnya aplikasi MEMS ini tidak terlepas dari keunggulannya seperti ukuran yang kecil, sensitivitas yang tinggi, dan biaya produksi yang relatif murah.

Sebagai sensor, MEMS umumnya diaplikasikan sebagai akselerometer yang berfungsi untuk mendeteksi besarnya gaya percepatan luar baik yang bersifat statis (gaya gravitasi) maupun yang bersifat dinamis. Selain sebagai akselerometer, MEMS juga dapat diaplikasikan sebagai sensor spektral molekuler. Keunggulan sensor spektral molekuler yang berbasis MEMS yaitu memiliki dimensi kecil, hanya membutuhkan daya yang kecil saat bekerja, biaya produksi yang murah, serta kinerja yang tinggi.

Semua keunggulan tersebut tidak terlepas dari prinsip kerja sensor MEMS spektral molekuler yang memanfaatkan fenomena kapasitansi. Kapasitansi ini timbul dari beberapa pasang plat pada struktur MEMS yang pada setiap pasangannya dicatu dengan beda tegangan tertentu. Prinsip dasar bagi sensor MEMS spektral elektroda (dan juga beberapa jenis sensor MEMS yang berbasis kapasitansi) ini dalam mengindera lingkungan sekitarnya atau objek target adalah melalui perubahan kapasitansi dari MEMS tersebut.

Ada dua hal yang dapat menyebabkan perubahan kapasitansi ini, yang pertama yaitu jika suatu bahan atau material diletakkan di atas plat MEMS sehingga mengganggu garis-garis fluks pada MEMS. Material yang diletakkan di daerah garis-garis fluks ini kemudian akan mengganggu dan merubah nilai kapasitansi MEMS. Dengan mengukur perubahan kapasitansi ini maka dapat ditentukan nilai permitivitas relatif dari material tersebut sehingga jenis material tersebut dapat ditentukan. Konsep ini dinamakan juga konsep FEF (*Fringing Electric Field*).

Hal yang kedua yaitu akibat pergerakan plat MEMS yang bersifat dinamis relatif terhadap plat lain yang dipasang statis akibat diaplikasikannya gaya luar pada MEMS. Dengan pergerakan ini maka akan terjadi perubahan jarak antarplat sehingga akan terjadi perubahan kapasitansi. Dengan mengukur perubahan kapasitansi, maka dapat diketahui perubahan jarak antarplat sehingga dapat diketahui gaya yang bekerja pada MEMS tersebut.

## 1.2 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah untuk merancang sebuah sistem MEMS yang dapat bekerja pada frekuensi resonansi mekanis sebesar 30 KHz. Pada skripsi ini juga akan dilakukan simulasi untuk melihat pengaruh besarnya nilai beda tegangan yang diaplikasikan pada elektroda sirip terhadap pergeseran elektroda sirip dan kemudian akan dilakukan simulasi untuk mengetahui pengaruh fenomena *sagging* pada struktur MEMS. Selain itu, akan dibahas juga pengaruh beberapa parameter pada MEMS seperti lebar dan panjang spring terhadap besarnya nilai konstanta pegas dan frekuensi resonansi mekanis MEMS. Skripsi ini juga ditulis sebagai salah satu syarat untuk mendapat gelar Sarjana Teknik jurusan Teknik Elektro dari Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

## 1.3 Pembatasan Masalah

Pada skripsi ini, penulis memberi pembatasan pembahasan pada beberapa hal yaitu:

1. Fungsi MEMS yang dibahas akan difokuskan pada MEMS sebagai sensor.
2. Jenis *spring* yang dipakai dan yang akan dianalisis dalam perancangan yaitu *stright truss folded beam*.
3. Parameter *spring* yang akan dibahas yaitu panjang *spring* ujung, lebar *spring* ujung dan tengah. Parameter panjang *spring* tengah dan jumlah serta letak *spring* tidak akan dibahas.
4. Proses fabrikasi MEMS tidak akan dibahas dalam skripsi ini.

5. Variasi massa tidak akan dibahas di dalam skripsi ini.

#### **1.4 Metodologi Penelitian**

Metodologi penelitian yang digunakan penulis dalam penulisan skripsi ini yaitu berupa studi literatur, konsultasi pengetahuan dasar dengan dosen pembimbing, dan melakukan perancangan rancang bangun MEMS dengan perangkat lunak 3DBuilder. Sementara itu, referensi rancang bangun MEMS yang diacu dari rancang bangun MEMS yang telah ada.

#### **1.5 Sistematika Penulisan**

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi lima bab. Pembahasan bab-bab tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

##### **BAB 1            PENDAHULUAN**

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang, tujuan, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan pada skripsi ini.

##### **BAB 2            DASAR TEORI**

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang berkaitan dengan MEMS, mulai dari definisi MEMS, prinsip kerja MEMS sebagai sensor, parameter-parameter yang mempengaruhi kinerja MEMS seperti teori elektrostatik, konstanta pegas, dan koefisien *damping*.

##### **BAB 3            PERANCANGAN SENSOR MEMS KAPASITIF**

Bab ini membahas perancangan MEMS sebagai sensor berbasis kapasitansi yang akan dibahas dalam skripsi ini yang meliputi penjelasan mengenai bagian-bagian MEMS yang akan dirancang beserta dimensinya serta pembahasan parameter-parameter yang

mempengaruhi kinerja dari sensor MEMS. Pada bab ini juga akan dibahas mengenai perangkat lunak Intellisuite<sup>®</sup> yang dipakai dalam perancangan MEMS dalam skripsi ini.

#### BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini berisi hasil simulasi yang dilakukan pada skripsi ini mengenai pengaruh dimensi *spring* terhadap nilai konstanta pegas dan frekuensi resonansi mekanis, desain akhir perancangan, pengaruh nilai tegangan terhadap pergeseran elektroda sirip, dan analisis fenomena *sagging* terhadap struktur MEMS.

#### BAB 5 KESIMPULAN

Bab ini berisi poin-poin kesimpulan yang dihasilkan dari pembahasan skripsi ini.

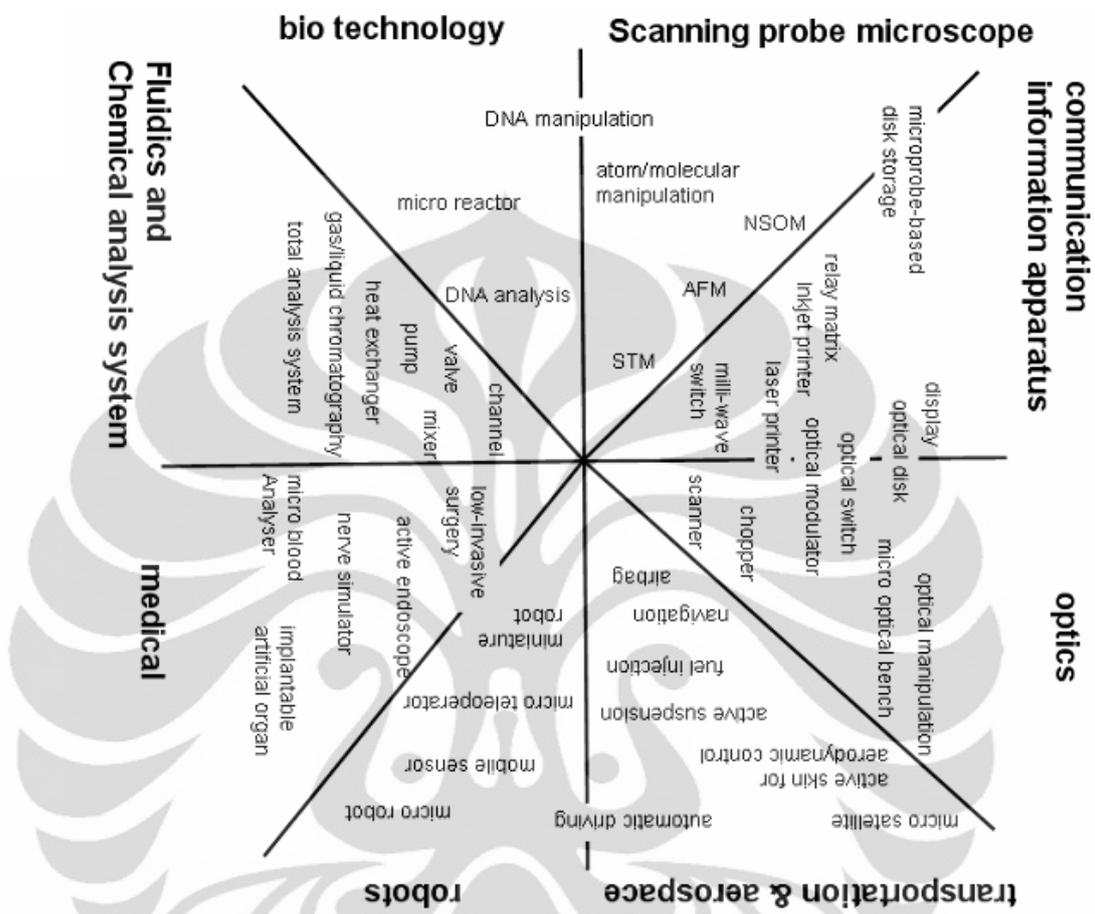
## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 MEMS

MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) adalah suatu sistem yang menggabungkan komponen mekanik dan elektrik yang didekati dalam skala mikro. Walaupun berada dalam skala mikro, MEMS tidak kehilangan sifat-sifat mekaniknya, seperti konstanta pegas ( $k$ ) dan koefisien *damping* ( $b$ ); maupun elektriknya, seperti kapasitansi, seperti pada saat berada dalam skala makro [1]. Hal ini memberikan keuntungan seperti memudahkan dalam hal perhitungan atau analisis numerik.

Dalam perkembangannya, MEMS sudah dikembangkan ke dalam beberapa fungsi seperti sensor dan aktuator dan juga sudah diintegrasikan ke beberapa divais seperti IC, peralatan komunikasi, dll. Bidang-bidang yang menyerap teknologi MEMS juga sudah meluas sejak pertama kali diperkenalkannya teknologi ini. Perkembangan ini tidak terlepas dari beberapa keunggulan MEMS dibanding beberapa teknologi pendahulunya, yaitu:

1. Memiliki ukuran yang kecil sehingga dapat mengurangi dimensi divais secara keseluruhan dan dapat diintegrasikan dengan divais lainnya.
2. Hanya membutuhkan daya kerja yang rendah.
3. Memiliki kinerja yang tinggi.
4. Biaya produksi murah karena sesuai dengan teknologi fabrikasi silikon yang sudah lebih dahulu diperkenalkan dan sudah lebih umum dipakai dalam proses produksi IC.



Gambar 2.1 Peta persebaran aplikasi MEMS [2].

Tabel 2.1 Tabel aplikasi MEMS dan nilai investasinya [3].

Sektor Aplikasi	2000 (dalam Juta Dolar)	2004 (dalam Juta Dolar)	Peningkatan (%)
Teknologi Informasi	8700	13400	11.5
Medis	2400	7400	32.5
Industri dan Otomasi	1190	1850	11.6
Telekomunikasi	130	3650	128.1
Otomotif	1260	2350	16.9
Pengawasan Lingkungan	520	1750	35.4

Dalam pengaplikasiannya, MEMS dapat digunakan sebagai aktuator maupun sensor. Sebagai aktuator, MEMS haruslah mempunyai kemampuan untuk menghasilkan suatu gaya aktuasi untuk dapat bekerja; sedangkan sebagai sensor, MEMS harus dapat mendeteksi sinyal yang merepresentasikan lingkungan atau objek yang diinderanya. Dalam ukuran makro, suatu sistem elektro-mekanikal biasanya menggunakan prinsip elektromagnetik sebagai sumber gaya aktuasi atau untuk penginderaan seperti dalam beberapa peralatan seperti *relay*, motor, generator, dll [4]. Namun saat sudah berada dalam ukuran mikro, penggunaan prinsip elektrostatik memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan prinsip magnetostatik, seperti [4]:

1. Kerapatan energi yang tersimpan di celah udara (dalam bentuk *surface force*) akibat gaya elektrostatik lebih baik (dalam artian lebih rapat) dibandingkan dengan akibat gaya magnetostatik (dalam bentuk *volume force*).
2. Aktuator elektrostatik lebih efisien karena hanya membutuhkan daya kerja rendah namun menghasilkan kinerja yang tinggi.
3. Material dengan properti magnetik dan desain dari magnetostatik aktuator kurang cocok dengan teknologi mikrofabrikasi silikon.
4. Pengontrol saklar tegangan pada sistem elektrostatik mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan sistem magnetostatik seperti fabrikasi yang mudah, kinerja yang lebih cepat, *energy loss* akibat *resistive heating* lebih kecil.

Sebagai sensor, MEMS memiliki banyak mekanisme untuk mengindera lingkungan sekitar atau objek target. Mekanisme pertama adalah dengan mengukur besarnya perubahan suatu parameter dari objek target seperti frekuensi resonansi, resistansi listrik, dll. Mekanisme kedua adalah perubahan pada struktur sensor (biasanya berupa pergeseran salah satu struktur sensor) di mana pengukuran perubahan ini dapat diidentifikasi melalui metode kapasitif, optik, elektromagnetik, *piezoelectric*, *piezoresistive*, dll.

## 2.2 Sensor MEMS Kapasitif

Dalam skripsi ini, fungsi MEMS yang akan dibahas oleh penulis adalah MEMS sebagai sensor dan metode penginderaan yang akan dibahas dibatasi pada metode kapasitif. Metode penginderaan kapasitif banyak diaplikasikan pada sensor MEMS karena mempunyai beberapa keunggulan seperti berikut [4]:

1. Sensitivitas yang tinggi.
2. *Loading error* yang dapat diabaikan.
3. Sensitivitas terhadap temperatur yang dapat diabaikan.
4. Tingkat *error hysteresis* yang mencapai nol.
5. Stabilitas dan kemampuan untuk diproduksi kembali (*reproducibility*) yang tinggi.
6. Menggunakan daya kerja yang rendah (tidak membutuhkan arus dalam jumlah besar).

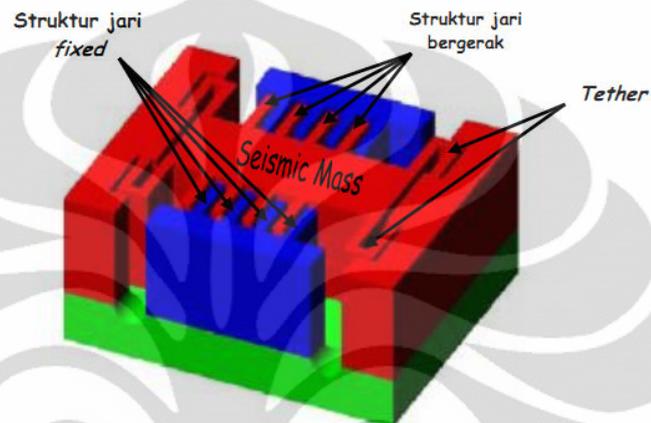
Pada sensor MEMS kapasitif, perubahan kapasitansi dimanfaatkan untuk mengindera lingkungan sekitar atau objek target. Perubahan kapasitansi dari sensor MEMS ini dimungkinkan karena:

1. Adanya gaya luar yang bekerja pada MEMS.
2. Adanya suatu material yang mengganggu garis fluks dari sensor MEMS kapasitif atau biasa disebut juga dengan fenomena FEF (*Fringing Field Effect*).

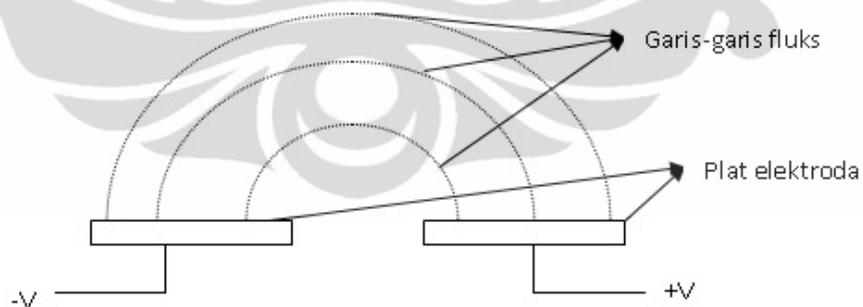
Mekanisme yang pertama biasa diaplikasikan pada sensor MEMS kapasitif sebagai akselerometer sementara mekanisme kedua banyak diaplikasikan pada sensor molekul.

Mekanisme yang pertama dapat dimungkinkan karena struktur MEMS yang digambarkan pada gambar 2.2. Pada gambar 2.2, sensor MEMS dapat beresilasi saat diberikan gaya luar. Ini dimungkinkan karena pada kedua ujung struktur MEMS tersebut terdapat pegas yang berbentuk batang. Sementara untuk mekanisme kedua dapat dilihat di gambar 2.3 di mana terdapat dua plat yang dicatu dengan beda potensial tertentu dalam posisi mendatar. Perubahan

kapasitansi terjadi saat ada suatu material berada dalam jangkauan garis-garis fluks. Perubahan kapasitansi ini terjadi karena nilai  $\epsilon_r$  mula-mula berubah sesuai dengan nilai  $\epsilon_r$  material tersebut sehingga jenis material yang berada di dalam garis-garis fluks tersebut dapat diketahui dari perubahan nilai kapasitansi.



Gambar 2.2 Struktur sensor MEMS kapasitif dengan model *proofmass fishbone*[5].



Gambar 2.3 Ilustrasi FEF.

### 2.2.1 Teori Elektrostatik

Dalam suatu sistem yang terdiri dari minimal dua plat sejajar yang dicatu dengan beda potensial tertentu akan timbul kapasitansi di antara keduanya berdasarkan persamaan:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

di mana  $C$  adalah kapasitansi (Farad),  $Q$  adalah banyaknya muatan (coulomb), dan  $V$  adalah besarnya beda potensial di antara kedua plat (volt). Selain dengan persamaan (2.1), besarnya kapasitansi juga dapat ditentukan melalui dua persamaan berikut:

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

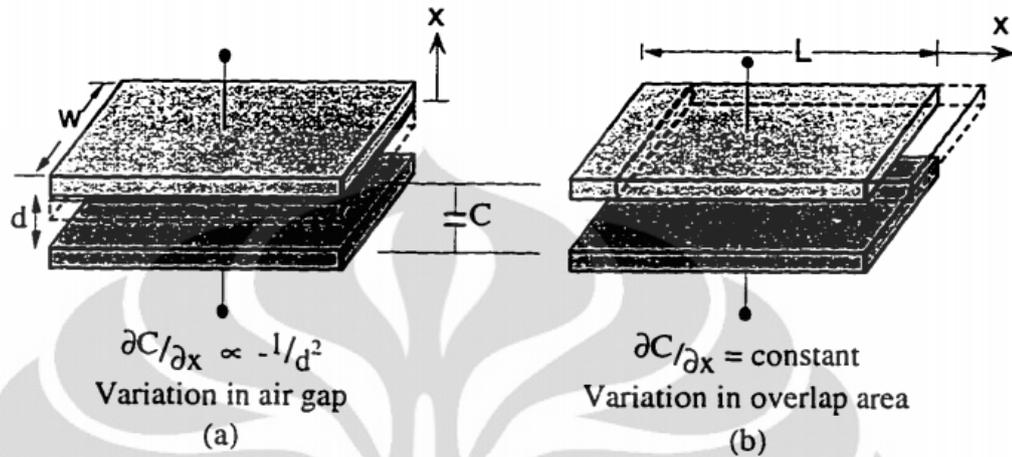
$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

di mana  $\epsilon_o$  = permitivitas vakum ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m),  $\epsilon_r$  = permitivitas relatif dielektrik atau bahan yang berada di antara kedua plat ( $\epsilon_r$  udara = 1),  $\epsilon$  = permitivitas mutlak,  $A$  = luas penampang plat ( $m^2$ ), dan  $d$  = jarak kedua plat (m).

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa dalam mengindera lingkungannya atau suatu objek target, suatu sensor MEMS kapasitif memanfaatkan besarnya perubahan kapasitansi pada struktur sensornya. Perubahan ini bisa terjadi karena adanya materi yang mengganggu garis-garis fluks MEMS atau karena adanya gaya luar yang bekerja pada sistem sensor yang menyebabkan perubahan jarak antara plat yang satu terhadap yang lain. Gaya luar yang bekerja pada struktur MEMS memungkinkan adanya dua tipe pergerakan yaitu:

1. Pergerakan tegak lurus suatu elektroda terhadap permukaan elektroda yang lainnya. Tipe pergerakan ini mengubah jarak di antara kedua plat (*varying air gap*).

2. Pergerakan paralel suatu elektroda terhadap permukaan elektroda yang lainnya (*varying overlapp area*).



Gambar 2.4 Dua tipe pergerakan satu plat elektroda relatif terhadap yang lain: (a) pergerakan tegak lurus dan (b) pergerakan paralel [4].

Tipe pergerakan pertama memiliki efek mengurangi jarak antarplat ( $\Delta d$ ) atau mengurangi lebar celah udara (*air gap*). Dengan mengasumsikan bahwa  $\Delta d \ll d$ , perubahan kapasitansi ( $\Delta C$ ) akibat mekanisme pergerakan ini dapat didapatkan melalui persamaan (2.4) dan (2.5).

$$\Delta C = \left( \frac{\epsilon A}{d} - \frac{\epsilon A}{d - \Delta d} \right) \approx -\frac{\epsilon A}{d^2} \Delta d \quad (2.4)$$

atau

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} \approx \frac{dC}{dx} = -\frac{\epsilon A}{d^2} \quad (2.5)$$

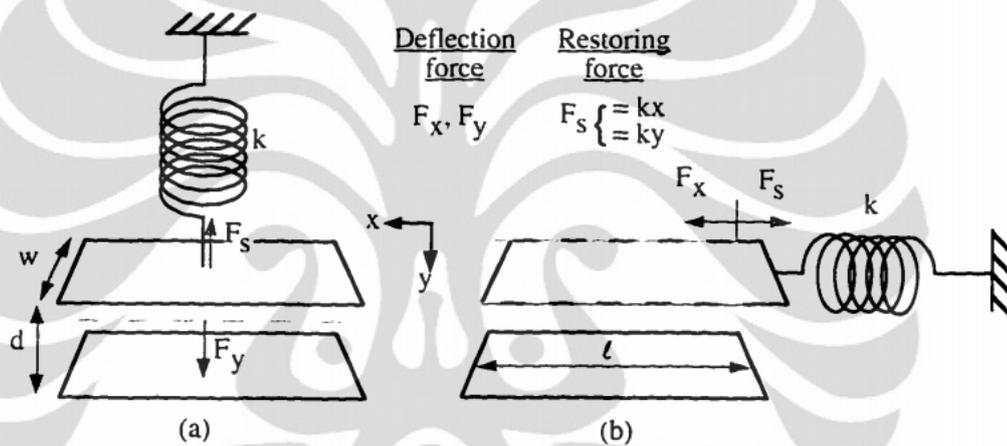
Tipe pergerakan kedua memiliki efek mengubah luas antarplat yang saling melingkupi ( $\Delta A$ ). Perubahan kapasitansi ( $\Delta C$ ) akibat mekanisme pergerakan ini dapat didapatkan melalui persamaan (2.6) dan (2.7).

$$\Delta C = \frac{\varepsilon \Delta A}{d} = \frac{\varepsilon w \Delta l}{d} \quad (2.6)$$

atau

$$\frac{\Delta C}{\Delta l} \approx \frac{\Delta C}{dx} = \frac{\varepsilon w}{d} \quad (2.7)$$

Untuk sensor kapasitif, kedua mekanisme pergerakan ini dimungkinkan karena adanya gaya luar yang bekerja pada sistem sensor. Keberadaan gaya ini dapat dilustrasikan melalui gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 Ilustrasi gaya yang menyebabkan perubahan kapasitansi pada sensor kapasitif: (a) pada pergerakan yang tegak lurus dan (b) pada pergerakan yang paralel [4].

Gambar 2.3 mengilustrasikan gaya yang bekerja pada sistem sensor kapasitif di mana gaya yang bekerja pada sistem (gaya defleksi maupun gaya *restoring*) merupakan gaya pegas sederhana yang dapat dinyatakan melalui persamaan (2.8).

$$F = k\Delta d \quad (2.8)$$

Dari persamaan (2.8) yang disubstitusi ke persamaan (2.4) dan (2.6), maka dapat dihitung besarnya perubahan kapasitansi ( $\Delta C$ ) pada sebuah sistem sensor kapasitif melalui besarnya gaya yang bekerja pada sistem tersebut atau sebaliknya melalui persamaan (2.9) dan (2.10).

Pergerakan tegak lurus:

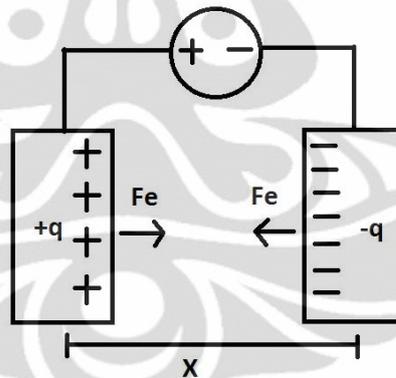
$$\Delta C = \frac{\varepsilon A F}{d^2 k} \quad (2.9)$$

Pergerakan paralel:

$$\Delta C = \frac{\varepsilon A F}{d k} \quad (2.10)$$

### 2.2.2 Pull-in Voltage

Saat terdapat dua buah plat konduktor yang diberi beda tegangan tertentu, tidak hanya terdapat kapasitansi di antara keduanya, namun juga suatu gaya yang dinamakan gaya elektrostatis.



Gambar 2.6 Ilustrasi gaya elektrostatis di antara dua plat yang diberi beda tegangan.

Besarnya nilai gaya elektrostatis seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 dapat ditentukan melalui prinsip kekekalan energi pada suatu sistem [6] seperti berikut:

$$\frac{d}{dt} W_e(q, x) = V \frac{dq}{dt} - F_e \frac{dx}{dt} \quad (2.8)$$

di mana  $\frac{d}{dt}W_e(q, x)$  merupakan laju perubahan dari energi yang terdapat pada sistem,  $V \frac{dq}{dt}$  menunjukkan besarnya daya listrik,  $F_e \frac{dx}{dt}$  menunjukkan besarnya usaha mekanis, dan variabel  $x$  menunjukkan besarnya pergeseran sistem secara fisik. Dengan mengalikan persamaan (2.8) dengan  $dt$ , akan menghasilkan persamaan (2.9) yang sering juga disebut persamaan kesetimbangan energi [6]:

$$dW_e = Vdq - F_e dx \quad (2.9)$$

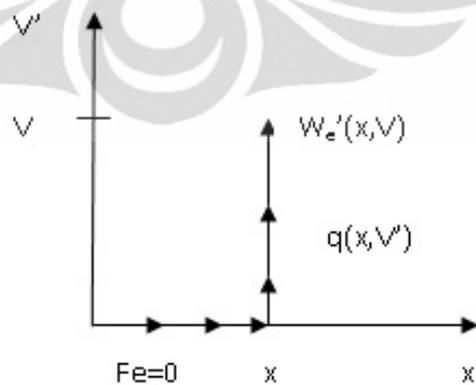
Persamaan (2.9) dapat juga diekspresikan dengan membuat variabel  $q$  dan  $x$  sebagai variabel bebas sehingga menghasilkan persamaan (2.10) seperti berikut:

$$dW_e' = qdV + F_e dx \quad (2.10)$$

di mana koenergi,  $W_e'(V, x)$ , didefinisikan sebagai:

$$W_e'(V, x) = qV - W_e \quad (2.11)$$

Persamaan (2.10) dapat diintegrasikan melalui sebuah jalur tertentu seperti pada gambar 2.7 berikut [6]:



Gambar 2.7 Jalur pengintegralan persamaan (2.10).

Sehingga didapat:

$$W_e' = \int_0^x F_e(x', V = 0) dx' + \int_0^V q(x, V') dV' \quad (2.12)$$

Pada persamaan (2.12),  $\int_0^x F_e(x', V = 0) dx'$  bernilai nol (0) karena jalur yang ditempuh dalam pengintegralannya ke arah  $V'$ , bukan ke arah  $x'$ . Dengan demikian, persamaan (2.12) menjadi:

$$W_e' = \int_0^V C(x) V' dV' \quad (2.13)$$

$$W_e' = \frac{1}{2} C(x) V^2 \quad (2.14)$$

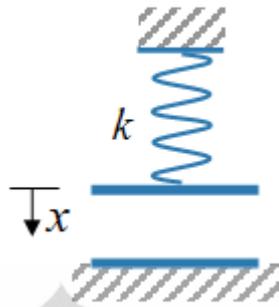
Gaya elektrostatis di antara kedua plat dapat ditentukan dengan melakukan operasi penurunan parsial terhadap persamaan (2.10). Dengan terlebih dahulu menempatkan  $F_e$  ke sisi paling kiri maka didapat [6]:

$$F_e = \frac{\partial W_e'}{\partial x} - q \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2.15)$$

di mana  $q \frac{\partial V}{\partial x}$  bernilai nol (0) karena  $V$  bernilai konstan. Dengan mensubstitusikan persamaan (2.14) ke persamaan (2.15) maka didapat:

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{dC(x)}{dx} V^2 \quad (2.16)$$

Persamaan (2.16) dapat dipakai untuk menghitung besarnya gaya elektrostatis di antara dua plat. Namun pada sebuah sistem MEMS, persamaan (2.16) belumlah akurat sepenuhnya karena adanya pegas pada sistem MEMS yang akan memberikan gaya yang berlawanan arah dengan  $F_e$ . Ilustrasi mengenai hal ini dapat dilihat pada gambar 2.8 yang merupakan skema dari sebuah aktuator:



Gambar 2.8 Skematik aktuator [7].

Pada gambar 2.8, saat beda potensial tertentu diberikan kepada kedua plat tersebut maka akan terdapat gaya elektrostatis yang menyebabkan jarak antarplat ( $d$ ) berkurang sebesar  $x$ . Gaya elektrostatis tersebut dilawan oleh gaya pegas sebesar  $F_x = kx$ . Namun pada nilai beda tegangan tertentu, gaya pegas tidak lagi sanggup melawan gaya elektrostatis yang muncul sehingga kedua plat akhirnya menempel sempurna. Besarnya beda potensial pada saat tersebut dinamakan *pull-in voltage*.

Untuk mengetahui persamaan *pull-in voltage* pada suatu sistem MEMS maka langkah pertama adalah dengan mengetahui besarnya energi potensial suatu sistem MEMS. Untuk sistem MEMS seperti pada gambar 2.8, maka besarnya energi potensialnya dapat dinyatakan melalui persamaan [7]:

$$E = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon A_{el}}{d-x} U^2 + \frac{1}{2} kx^2 \quad (2.17)$$

di mana  $-\frac{1}{2} \frac{\varepsilon A_{el}}{d-x} U^2$  merupakan besarnya energi potensial dari dua plat sejajar yang dicatu suatu beda potensial tertentu dan  $\frac{1}{2} kx^2$  merupakan energi potensial yang tersimpan pada pegas (*spring*). Besarnya gaya yang bekerja pada kedua plat tersebut dapat ditentukan dengan menurunkan persamaan (2.17) terhadap  $x$  menjadi:

$$F = -\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon A_{el}}{(d-x)^2} U^2 - kx \quad (2.18)$$

Saat keadaan setimbang, gaya elektrostatik dan gaya pegas saling meniadakan sehingga persamaan (2.18) menjadi:

$$kx = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon A_{el}}{(d-x)^2} U^2 \quad (2.19)$$

Sementara itu, nilai *pull-in voltage* dapat ditentukan dengan menurunkan persamaan (2.18) terhadap  $x$  menjadi:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\varepsilon A_{el}}{(d-x)^3} U^2 - k \quad (2.20)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (2.19) ke persamaan (2.20) maka didapat:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{2kx}{(d-x)} - k \quad (2.21)$$

Dengan tidak adanya tegangan maka persamaan (2.21) akan menghasilkan  $\frac{\partial F}{\partial x} = -k$ . Dengan meningkatkan nilai tegangan maka nilai  $k$  akan menjadi semakin positif. Namun kenaikan nilai tegangan ini akan mengakibatkan ketidakstabilan. Ketidakstabilan ini akan muncul saat  $x = \frac{1}{3}d$ . Dengan mensubstitusikan nilai  $x = \frac{1}{3}d$  ini ke persamaan (2.19) maka nilai *pull-in voltage* ( $V_p$ ) dari gambar 2.8 menjadi:

$$V_p = \sqrt{\frac{8kd^3}{27\varepsilon A_{el}}} \quad (2.22)$$

### 2.3 Persamaan Mekanika Umum MEMS

Dalam kerjanya, selain mengaplikasikan fenomena elektrostatik, sebuah sistem MEMS juga mengaplikasikan gerakan mekanis. Hal ini dapat dilihat pada

gambar 2.8 di mana selain terdapat sepasang plat seperti kapasitor juga terdapat pegas yang menyebabkan keseluruhan sistem dapat mengalami osilasi.

Untuk dapat menemukan persamaan mekanika umum dari MEMS, maka dapat dimulai dengan memilih sebuah sistem yang memiliki derajat kebebasan sebanyak  $n$  buah yang dapat dinyatakan ke dalam  $n$  buah koordinat, yaitu  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ , serta berada dalam suatu waktu  $t$  tertentu. Dalam sistem seperti ini maka untuk menentukan persamaan gerakannya dapat menggunakan persamaan Lagrange [8]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial q'_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (2.23)$$

di mana  $L=T-V$  adalah sebuah operator Lagrange,  $T$  adalah total energi kinetik dari sistem,  $V$  adalah total energi potensial dari sistem. Bagian paling kiri dari persamaan (2.23) merupakan gaya konservatif. Jika terdapat gaya luar yang bekerja pada sistem tersebut, misalnya *viscous damping*, maka persamaan (2.23) berubah menjadi [6]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial q'_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial F}{\partial q_i} = Q_{ext,i} \quad ; i = 1, \dots, n \quad (2.24)$$

di mana  $F$  adalah fungsi disipasi Rayleigh dan  $Q_{ext,i}$  adalah gaya eksternal pada sistem pada koordinat  $q_i$ . Persamaan (2.24) dapat dijabarkan menjadi:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} q'_i q'_j \quad (2.25)$$

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} q_i q_j \quad (2.26)$$

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} q'_i q'_j \quad (2.27)$$

di mana  $m_{ij}$  merupakan koefisien inersia,  $k_{ij}$  merupakan koefisien pegas, dan  $B_{ij}$  merupakan koefisien *damping*.

Untuk menentukan persamaan mekanika umum MEMS, maka dapat dilihat pada gambar 2.9 di mana terdapat sebuah sistem plat terhubung ke pegas pada keempat sisinya [6]. Ada enam koordinat yang akan dianalisis, yaitu koordinat Cartesian  $x, y, z$ ; dan koordinat sudut rotasi  $\theta, \phi$ , dan  $\psi$ . Energi potensial yang tersimpan dalam pegas pada sistem tersebut dinyatakan dalam penjumlahan energi potensial dari keempat pegas. Dengan pendekatan dengan nilai sudut yang kecil maka didapat:

$$V = 2(k_x x^2 + k_y y^2 + k_z z^2 + k_z L_{ky}^2 \theta^2 + k_z L_{kx}^2 \phi^2 + k_y L_{kx}^2 \psi^2) \quad (2.28)$$

di mana  $k_x, k_y$ , dan  $k_z$  merupakan konstanta pegas masing-masing pada koordinat  $x, y$ , dan  $z$ . Sedangkan  $L_{kx}$  dan  $L_{ky}$  merupakan jarak pada koordinat  $x$  dan  $y$  dari pusat plat seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.9. Pada persamaan (2.28) diasumsikan bahwa gaya yang bekerja pada sistem berbanding lurus dengan pergeseran fisik sistem. Jika gaya luar yang bekerja tidak berbanding lurus dengan pergeseran fisik sistem maka konstanta pegas yang merupakan fungsi dari posisi dapat disubstitusikan ke persamaan (2.28).

Sementara itu, dengan mengasumsikan sistem tersebut mempunyai pegas yang massanya dapat diabaikan maka energi kinetik dari sistem dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$T = \frac{1}{2}(m\dot{x}^2 + m\dot{y}^2 + m\dot{z}^2 + I_\theta \dot{\theta}^2 + I_\phi \dot{\phi}^2 + I_\psi \dot{\psi}^2) \quad (2.29)$$

persamaan (2.29) dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$I_\theta = \frac{m}{12} L_y^2 \quad (2.30)$$

$$I_{\phi} = \frac{m}{12} L_x^2 \quad (2.31)$$

$$I_{\psi} = \frac{m}{12} (L_x^2 + L_y^2) \quad (2.32)$$

Sementara itu, *viscous damping* dari plat dapat dapat diekpresikan dengan fungsi disipasi sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{2} (B_x x'^2 + B_y y'^2 + B_z z'^2 + B_{\theta} \theta'^2 + B_{\phi} \phi'^2 + B_{\psi} \psi'^2) \quad (2.33)$$

di mana  $B_x, B_y, B_z, B_{\theta}, B_{\phi}$ , dan  $B_{\psi}$  merupakan koefisien *damping* pada keenam koordinat. Persamaan (2.28), (2.29), dan (2.33) kemudian disubstitusikan ke persamaan (2.24). Untuk menyederhanakan perhitungan maka hanya perhitungan pada koordinat  $x$  saja yang ditampilkan pada skripsi ini. Perhitungan pada koordinat lainnya tidak berbeda dari perhitungan pada koordinat  $x$ . Berikut adalah perhitungannya:

$$L = T - V \quad (2.34)$$

$$L_x = \frac{1}{2} m x'^2 - 2k_x x^2 \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial L_x}{\partial q'_i} = m x' \quad (2.36)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_x}{\partial q'_i} \right) = m x'' \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial L_x}{\partial q_i} = -k_x x \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial F_x}{\partial q_i} = B_x x' \quad (2.39)$$

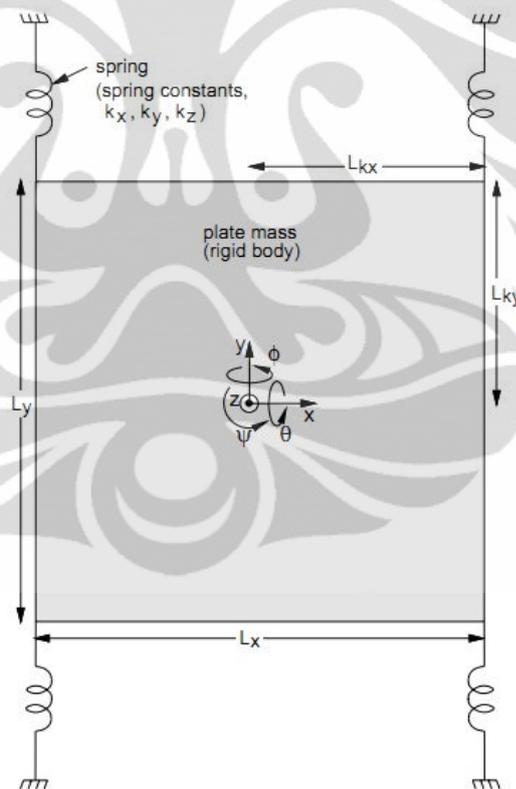
dengan mensubstitusikan persamaan (2.37), (2.38), dan (2.39) ke persamaan (2.24) menghasilkan:

$$F_x = mx'' + B_x x' + k_x x \quad (2.40)$$

atau dalam bentuk lain menjadi:

$$F_x = m \frac{d^2 x}{dt^2} + B_x \frac{dx}{dt} + k_x x \quad (2.41)$$

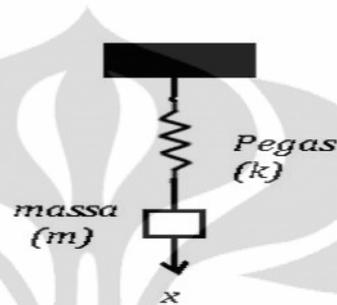
Persamaan (2.41) merupakan persamaan mekanik umum dari sebuah sistem MEMS. Pada persamaan tersebut dapat dinyatakan bahwa terdapat tiga variabel yang mempengaruhi gerakan mekanis yang bekerja pada suatu sistem MEMS yaitu massa ( $m$ ), koefisien pegas ( $k$ ), dan koefisien *damping* ( $b$ ).



Gambar 2.9 Skema plat yang dihubungkan dengan sistem pegas [6].

### 2.3.1 Konstanta Pegas

Prinsip dasar dari MEMS adalah getaran mekanik. Sistem paling sederhana yang dapat merepresentasikan getara mekanik ini adalah sistem pegas dengan sebuah beban seperti gambar 2.10 [1].



Gambar 2.10 Sistem pegas dengan sebuah beban [1].

Sistem pada gambar 2.10 mempunyai frekuensi resonansi mekanis sebesar:

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.42)$$

di mana  $f_R$  = frekuensi resonansi (Hz),  $k$  = konstanta pegas (N/m), dan  $m$  = massa beban (kg). Sementara itu, frekuensi sudut ( $\omega$ ) dari sistem pada gambar 2.10 dapat dinyatakan dalam:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.43)$$

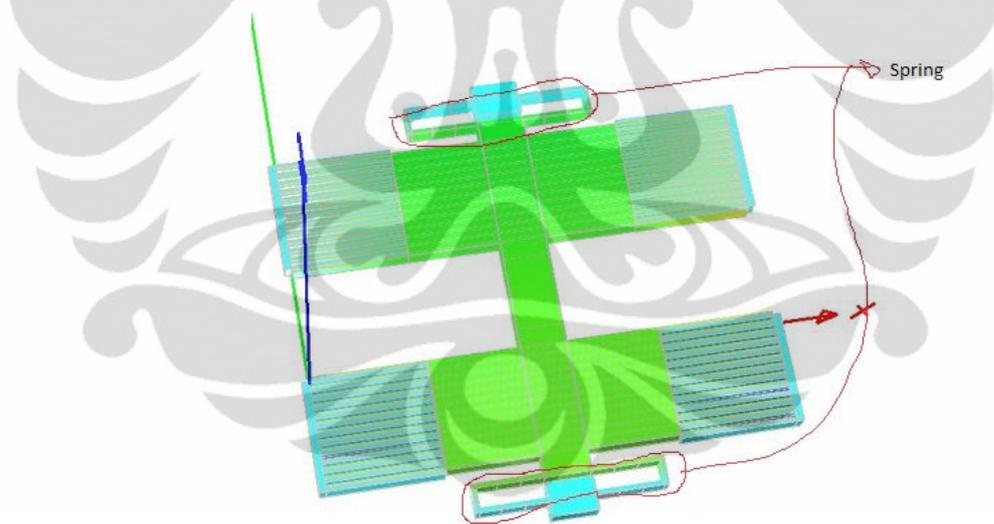
Pada gambar 2.10, benda yang memiliki konstanta pegas ( $k$ ) adalah pegas itu sendiri. Pegas inilah yang membuat massa ( $m$ ) dapat berayun dengan frekuensi tertentu. Gaya luar yang bekerja pada sistem yang terdapat dalam gambar 2.10 dapat direpresentasikan dengan persamaan:

$$F = ma = -k\Delta x \quad (2.44)$$

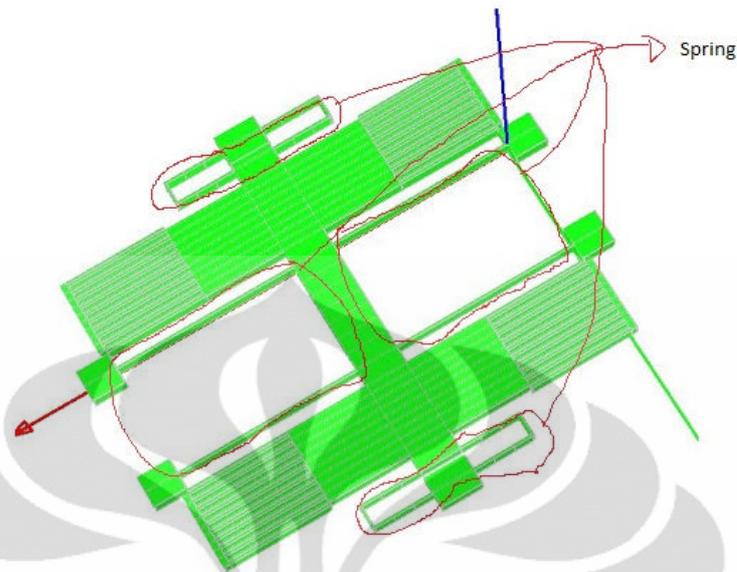
di mana  $F$  = gaya luar (N),  $k$  = konstanta pegas (N/m),  $\Delta x$  = perubahan panjang pegas (m).

Representasi seperti ini juga berlaku pada MEMS. Pada MEMS, ada bagian yang juga berperan sama seperti pegas pada gambar 2.10. Bagian ini sering disebut *spring* atau suspensi. *Spring* pada MEMS umumnya menempel pada bagian *proofmass*. *Proofmass* merupakan bagian terbesar dari MEMS dan merupakan penyumbang massa terbesar pada suatu sistem MEMS. Pada *proofmass* menempel sirip atau plat elektroda yang digunakan sebagai perangkat utama pengideraan pada MEMS kapasitif. Pada skripsi ini akan membahas struktur MEMS yang memiliki *proofmass* berjenis *fishbone*.

*Spring* pada MEMS yang memiliki *proofmass* berjenis *fishbone* umumnya terletak di kedua ujung struktur MEMS, walaupun pada beberapa rancang bangun, *spring* juga dapat ditempatkan di ujung dan di tengah struktur MEMS. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.11 dan 2.12.



Gambar 2.11 Spring pada ujung struktur MEMS.

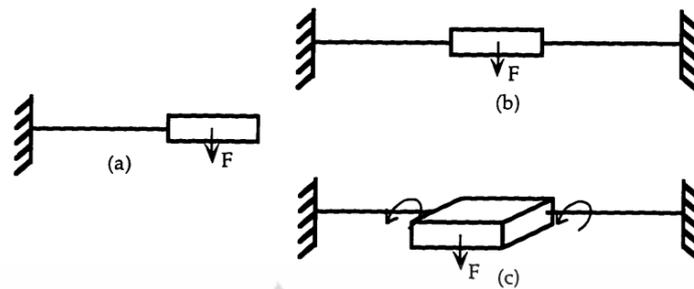


Gambar 2.12 Spring pada ujung dan tengah struktur MEMS.

*Spring* pada MEMS pada umumnya menggunakan bentuk batang atau balok daripada bentuk *spring* spiral yang pada umumnya terdapat pada sistem-sistem berukuran makro. Ada dua alasan utama yang mendasari hal ini yaitu [4]:

1. Proses fabrikasi spring berbentuk balok atau batang lebih mudah daripada spring yang berbentuk spiral.
2. Untuk pergeseran dalam ukuran kecil (yang biasanya terjadi pada sistem MEMS), besarnya defleksi berbanding lurus dengan besarnya gaya luar yang menyebabkan sistem MEMS tersebut mengalami pergeseran.

Secara umum, terdapat tiga konfigurasi spring pada MEMS, yaitu *cantilever*, *bridge*, dan *two-point torsional beams*. Gambar 2.13 menunjukkan ketiga konfigurasi tersebut.

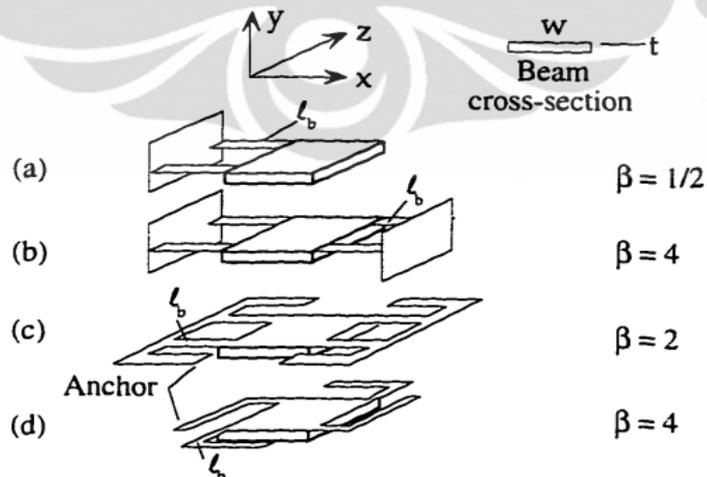


Gambar 2.13 Konfigurasi dari spring MEMS (a) *cantilever*, (b) *bridge*, (c) *two-point torsional beams* [4].

Nilai  $k$  dari ketiga konfigurasi tersebut dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

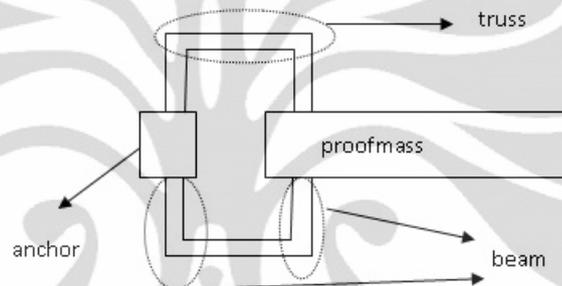
$$k = \beta \frac{Ewt^2}{l^3} \quad (2.45)$$

di mana  $k$  = konstanta pegas (N/m),  $E$  = modulus Young (GPa),  $\beta$  = faktor proporsionalitas; serta  $l$ ,  $w$ , dan  $t$  adalah dimensi *spring* berdasarkan koordinat  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Gambar 3.14 menunjukkan konfigurasi *spring* dan nilai  $\beta$  dari masing-masing konfigurasi.

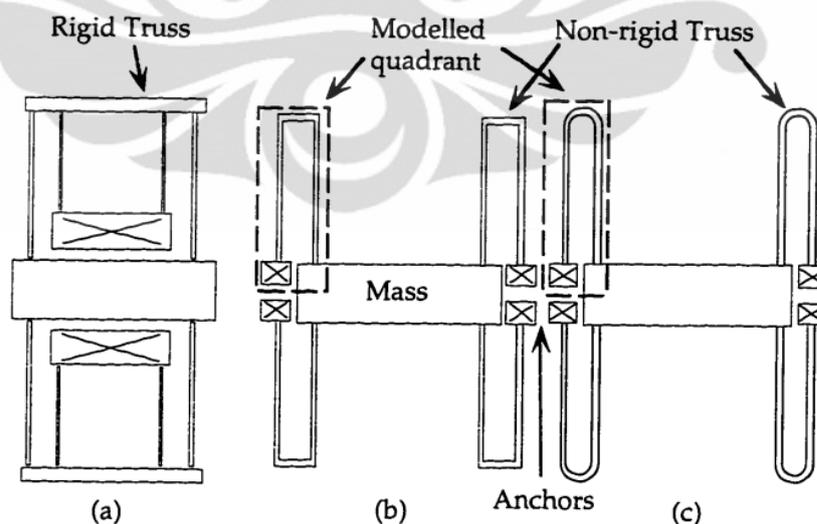


Gambar 2.14 Konfigurasi spring dan nilai  $\beta$  dari masing-masing konfigurasi [4].

*Spring* dalam MEMS dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian yang dinamakan *beam* dan *truss*. Berdasarkan keadaan *truss*-nya, konfigurasi spring dapat dibagi menjadi dua, yaitu *rigid truss* dan *non-rigid truss*. Dalam skripsi ini, penulis akan berfokus pada konfigurasi *non-rigid truss*. Untuk konfigurasi *non-rigid truss*, terdapat dua macam tipe lagi, yaitu *straight truss design* dan *curve straight truss design*. Dalam skripsi ini, penulis memakai desain *straight truss folded beam* pada perancangan MEMS sehingga hanya desain ini saja yang akan dibahas. Gambar 2.15 menunjukkan bagian *truss* dan *beam* serta desain MEMS yang menggunakan *rigid truss* dan *non-rigid truss*.

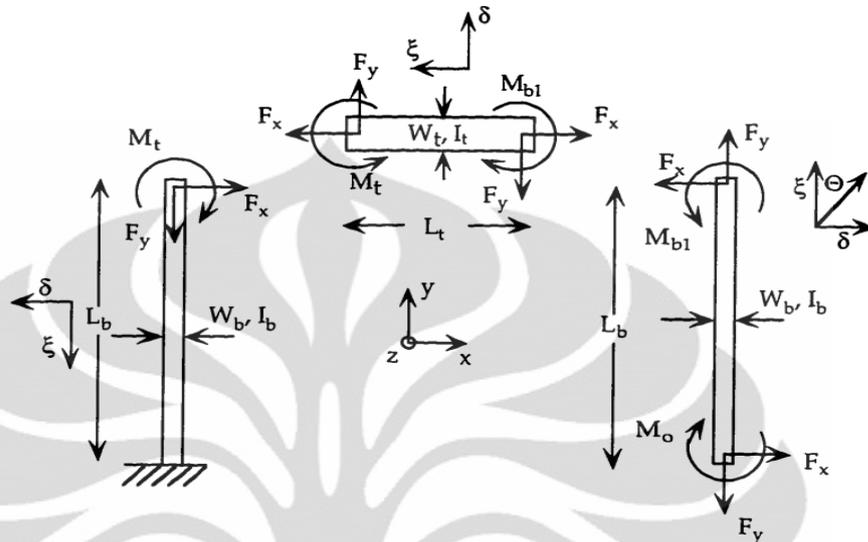


Gambar 2.15 *Beam* dan *truss* pada spring MEMS.



Gambar 2.16 (a) *rigid truss*, (b) *non-rigid straight truss*, dan (c) *non-rigid curved truss* [4].

### 2.3.1.1 Straight Truss Design



Gambar 2.17 Analisis per-bagian dari *straight truss design* [4].

Parameter penting yang akan dicari dalam analisis ini yaitu  $K_x$  dan  $K_y$ . Parameter yang pertama yaitu  $K_x$ . Untuk mendapatkan nilai  $K_x$  maka langkah pertama yaitu menyusun persamaan untuk  $M_o$  dan  $F_y$  dalam  $F_x$  sehingga nantinya akan didapat persamaan  $K_x = \frac{F_x}{\delta_x}$ . Langkah selanjutnya adalah mengeliminasi  $M_o$  dan  $F_y$  dengan membuat nilai  $\Theta = 0$  dan  $\delta_x = 0$ . Dengan teorema Castigliano [4]:

$$\Theta = \frac{dU}{dM_o} \quad (2.46)$$

maka didapat:

$$M_o = F_x L_b \frac{(L_b + \alpha L_t)}{(2L_b + \alpha L_t)} + F_y \frac{L_t}{2} \quad (2.47)$$

di mana  $\alpha = I_b/I_t$ . Kemudian, dengan memakai batasan  $\delta_y = 0$ ; maka didapat:

$$\partial_x = \frac{dU}{dF_x} \quad (2.48)$$

sehingga diperoleh:

$$F_y = 0. \quad (2.49)$$

selanjutnya dengan menggunakan persamaan (2.48) maka diperoleh:

$$\partial_x = F_x \frac{L_b^3 (L_b + 2\alpha L_t)}{3EI(2L_b + \alpha L_t)} \quad (2.50)$$

untuk sebuah sistem yang menggunakan *folded beam* yang terdiri dari empat bagian, total  $K_x$  adalah:

$$K_x = K_{x,4} = 4 \frac{F_x}{\partial_x} \quad (2.51)$$

atau:

$$K_x = \frac{12EI(2 + \alpha\beta)}{L_b^3(1 + 2\alpha\beta)} \quad (2.52)$$

di mana  $\beta = L_t/L_b$ .

Untuk keadaan tertentu di mana nilai  $\beta$  mendekati nol, yaitu saat panjang *truss* sangat kecil dibanding dengan panjang *beam*, maka persamaan untuk  $K_x$  dapat didekati oleh persamaan untuk *rigid truss design*:

$$K_x = 24EI / L_b^3 \quad (2.53)$$

Parameter yang kedua yaitu  $K_y$ . Langkah-langkah untuk mendapatkan persamaan untuk  $K_y$  sama dengan langkah-langkah untuk mendapatkan persamaan  $K_x$ . Pertama-pertama persamaan (2.48) digunakan sebagai syarat batas. Karena  $M_0$  telah didapatkan, maka yang perlu dicari yaitu persamaan  $F_x$  dalam  $F_y$ . Dengan memakai persamaan (2.45), maka didapat:

$$F_x = F_y \frac{3\beta(1 + \alpha\beta)(2 + \alpha\beta)}{(1 + 2\alpha\beta)} \quad (2.54)$$

kemudian dengan menyelesaikan persamaan:

$$\partial_y = \frac{dU}{dF_y} \quad (2.55)$$

maka diperoleh:

$$\partial_y = Fy \frac{L_t^3}{2EI_b} \left[ \frac{1}{\beta} + \frac{\alpha}{6} \right] \quad (2.56)$$

dengan menggunakan bentuk persamaan (2.51), maka diperoleh:

$$K_y = \frac{48EI_b}{L_t^3 \left( \frac{6}{\beta} + \alpha \right)} \quad (2.57)$$

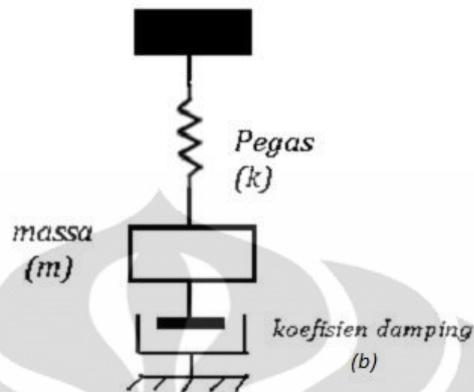
### 2.3.2 Koefisien Damping

Saat bekerja, suatu sistem MEMS mengalami suatu mekanisme hambatan yang disebabkan oleh fluida di sekitarnya (dalam sebagian besar kasus adalah udara). Hambatan oleh fluida di sekitarnya ini disebut dengan mekanisme *damping* atau *viscous damping* dan suatu besaran yang menunjukkan besarnya ukuran numerik dari hambatan ini dinamakan koefisien *damping* ( $b$ ). Pada sistem pegas dalam skala makro, gesekan seperti ini hanya berpengaruh sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Namun pada sistem dengan skala mikro seperti MEMS, gesekan ini dapat menimbulkan efek yang cukup signifikan.

Representasi dari koefisien *damping* ( $b$ ) ini dapat dilihat pada gambar 2.18. Mekanisme *damping* pada suatu sistem MEMS memiliki dua bentuk berdasarkan pergerakan dari elemen inertianya dan pergerakan elektroda relatif terhadap bagian yang statis dari sistem MEMS tersebut. Kedua bentuk Mekanisme *damping* tersebut yaitu:

1. *Squeeze film damping*.

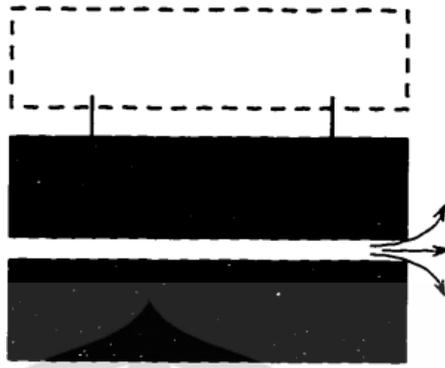
## 2. *Viscous drag damping.*



Gambar 2.18 Representasi dari koefisien damping [1].

### 2.3.2.1 Squeeze Film Damping

*Squeeze film damping* adalah suatu mekanisme *damping* atau redaman yang terjadi saat suatu plat elektroda yang dinamis dari suatu sistem MEMS bergerak tegak lurus relatif terhadap plat elektroda yang statis. Pergerakan semacam ini menyebabkan berubahnya jarak antarplat sehingga fluida yang berada di antara kedua plat akan terkompresi dan pada saat tertentu akan keluar ke segala arah melalui celah-celah di antara kedua plat elektroda tersebut. Proses pemampatan dan keluarnya fluida ini menyebabkan gesekan antara sesama partikel fluida maupun antara partikel fluida dengan permukaan kedua elektroda sehingga menghambat pergerakan plat elektroda yang dinamis. Hal ini dapat direpresentasikan oleh gambar 2.19.

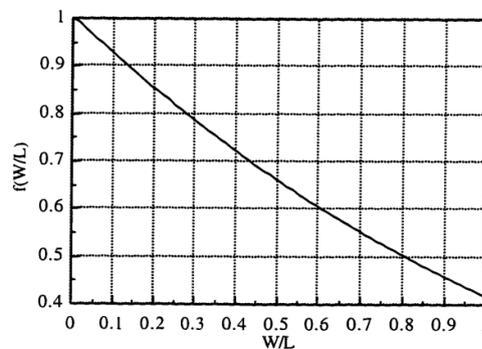


Gambar 2.19 *Squeeze damping* akibat perubahan jarak antarplat [4].

Berikut adalah persamaan yang menghubungkan koefisien *damping*, dimensi plat, jenis fluida, dan jarak antarplat pada mekanisme *squeeze damping* [4]:

$$b = f\left(\frac{W}{L}\right) \mu \frac{W^3 L}{d^3} \quad (2.58)$$

di mana  $b$  = koefisien *damping*,  $f(W/L)$  = *numeric coefficient* (0,4217 untuk  $W/L = 1$  atau persegi dan 1 untuk  $W/L$  mendekati nol atau segi empat),  $\mu$  = viskositas dari fluida di antara kedua plat (kg/m.s),  $W$  = dimensi terkecil dari penampang plat (m),  $L$  = dimensi terbesar dari penampang plat (m),  $d$  = jarak antarplat mula-mula (m). Hubungan antara  $f(W/L)$  dengan  $W/L$  dapat digambarkan melalui gambar grafik 2.20.



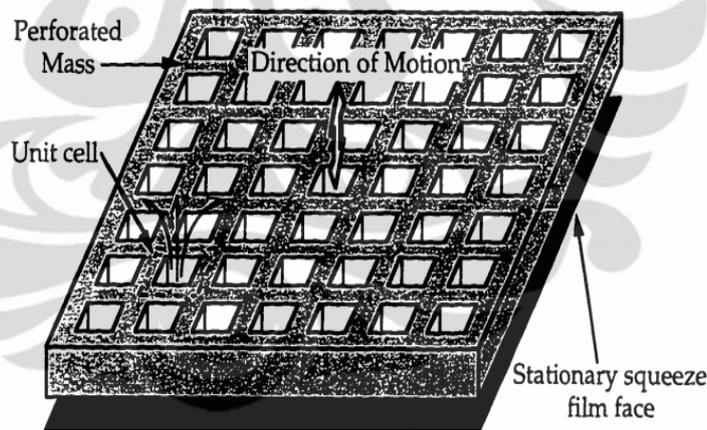
Gambar 2.20 Grafik  $f(W/L)$  vs  $W/L$  [4].

Terdapat juga hubungan antara massa plat, sensitivitas, dan *damping coefficient* yang ditunjukkan oleh persamaan berikut [4]:

$$\frac{b}{m} = 0.4217\mu \frac{L^2}{\rho t d^3} \quad (2.59)$$

di mana  $m$  = massa plat (kg),  $\rho$  = massa jenis plat ( $\text{kg/m}^3$ ),  $L$  = sisi dari plat (m), dan  $t$  = ketebalan dari plat (m). Persamaan (2.59) diasumsikan bahwa plat berbentuk persegi. Jika plat berbentuk persegi panjang maka besaran  $L^2$  dapat diganti dengan  $L \times W$ .

Dengan menggunakan permukaan elektroda yang berpori maka faktor  $b/m$  dapat dikurangi secara drastis. Sementara itu, dengan permukaan yang berpori, plat elektroda dapat memiliki lingkupan yang lebih luas sehingga dapat meningkatkan sensitivitas sinyal kapasitansi tanpa harus meningkatkan faktor  $b/m$ .



Gambar 2.21 Permukaan elektroda yang berpori yang bergerak secara vertikal [4].

Berikut adalah persamaan koefisien *damping* ( $b$ ), massa ( $m$ ), dan kapasitansi ( $C$ ) dari elektroda yang berpori [4]:

$$b = n \left( 0.4217\mu \frac{L^4}{d^3} \right) \quad (2.60)$$

$$m = n(\rho t L^2) \quad (2.61)$$

$$C = n \left( \varepsilon \frac{L^2}{d} \right) \quad (2.62)$$

$$L = \sqrt{L_c^2 - L_h^2} \quad (2.63)$$

di mana  $L_c$  adalah luas elektroda tanpa pori dan  $L_h$  luas total pori dalam elektroda. Dapat dilihat juga bahwa saat persamaan (2.60) dan (2.61) dikombinasikan akan menghasilkan persamaan (2.59).

Nilai *squeeze film damping* di antara elektroda yang sempit dan panjang (seperti struktur sirip atau *comb finger*) akan lebih kecil dibandingkan dengan elektroda yang berukuran besar. Hal ini dapat dibuktikan dengan persamaan (2.58) di mana  $b$  sebanding dengan pangkat tiga dari  $W$ .

Berdasarkan fakta ini maka akan lebih menguntungkan untuk memakai elektroda berbentuk sirip dalam jumlah tertentu daripada memakai satu elektroda yang berukuran besar sebagai *sensing element*. Dengan desain ini maka nilai  $b$  akan dapat dikurangi secara maksimal tanpa mengurangi sensitivitas mekanikal dan elektrikalnya.

Persamaan koefisien *damping* yang berlaku pada struktur sirip atau elektroda atau *comb finger* yaitu sebagai berikut [4]:

$$b_{comb} = 2n\mu \frac{W^3 L}{d^3} \quad (2.64)$$

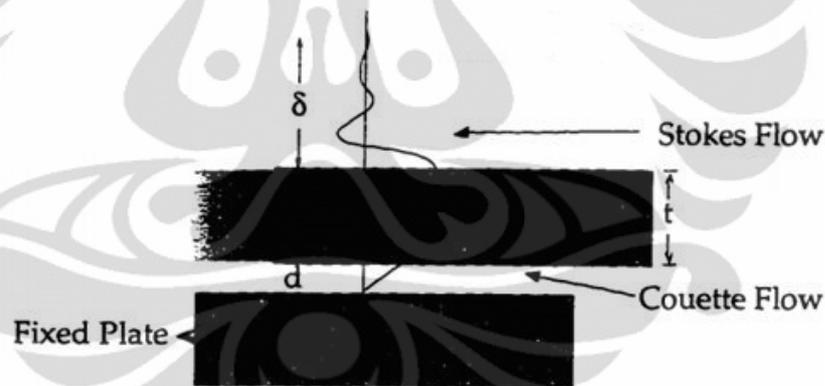
Pada persamaan (2.64) terdapat faktor  $2n$  karena untuk setiap  $n$  elektroda dinamis saat bergerak relatif terhadap elektroda statis maka akan terjadi proses redaman pada dua sisinya, pertama terhadap sisi yang menuju elektroda statis dan kedua terhadap sisi yang menjauhi elektroda statis.

### 2.3.2.2 Viscous Drag Damping

*Viscous drag damping* adalah mekanisme redaman atau *damping* yang terjadi saat suatu plat elektroda yang dinamis dari suatu sistem MEMS bergerak sejajar atau paralel relatif terhadap plat elektroda yang statis. Karena pergerakan ini maka fluida yang berada di antara keduanya akan ikut bergerak dan menimbulkan gesekan bagi kedua elektroda dan menimbulkan redaman terhadap gerakan elektroda secara keseluruhan.

Terlihat pada gambar 2.22 bahwa terdapat *Couette Flow* dan *Stokes Flow*. *Couette Flow* merupakan mekanisme damping yang terjadi di daerah antara kedua plat. Persamaan koefisien *damping* berdasarkan *Couette Flow* adalah sebagai berikut [4]:

$$b_c = \frac{\mu A}{d} \quad (2.65)$$



Gambar 2.22 *Viscous drag damping* [4].

di mana  $b_c$  = koefisien *damping* akibat Couette Flow,  $A$  = luas area yang dilingkupi oleh elektroda bergerak dan statis (m),  $\mu$  = viskositas fluida (kg/m.s), dan  $d$  = jarak antaelektroda (m).

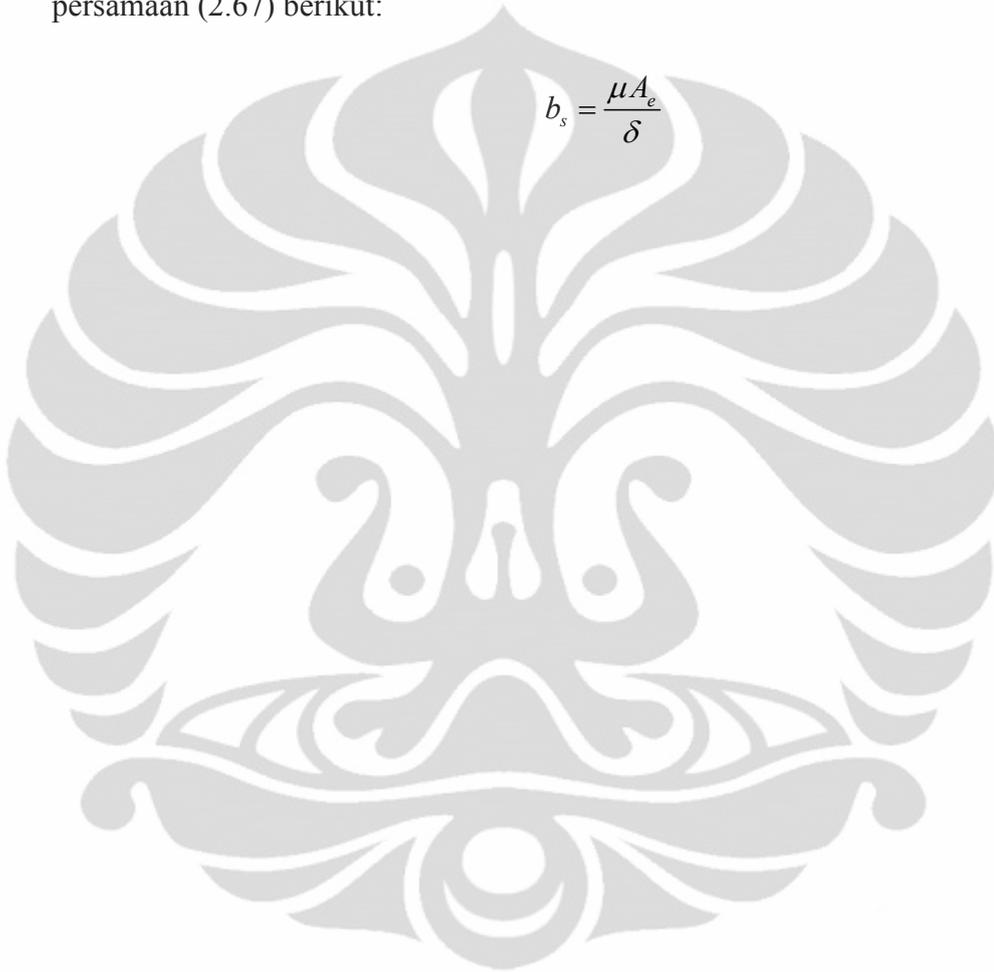
Sementara itu, *Stokes Flow* berkontribusi pada koefisien *damping* pada bagian atas elektroda. Osilasi dari pergerakan fluida pada bagian atas elektroda akibat *Stoke Flow* ini dapat dimodelkan berkurang secara eksponensial sejalan dengan jarak yang semakin jauh dari permukaan plat elektroda. Amplitudo dari osilasi fluida tersebut berkurang sebesar faktor  $e$  sejalan dengan besarnya  $\delta$

(*penetration depth*). Faktor  $\delta$  ini merupakan fungsi dari frekuensi getaran dari plat ( $\omega$ ) dan dapat dilihat di persamaan berikut [4]:

$$\delta(\omega) = \sqrt{2\nu / \omega} \quad (2.66)$$

Sementara itu, koefisien *damping* akibat *Stoke Flow* dapat dilihat melalui persamaan (2.67) berikut:

$$b_s = \frac{\mu A_e}{\delta} \quad (2.67)$$

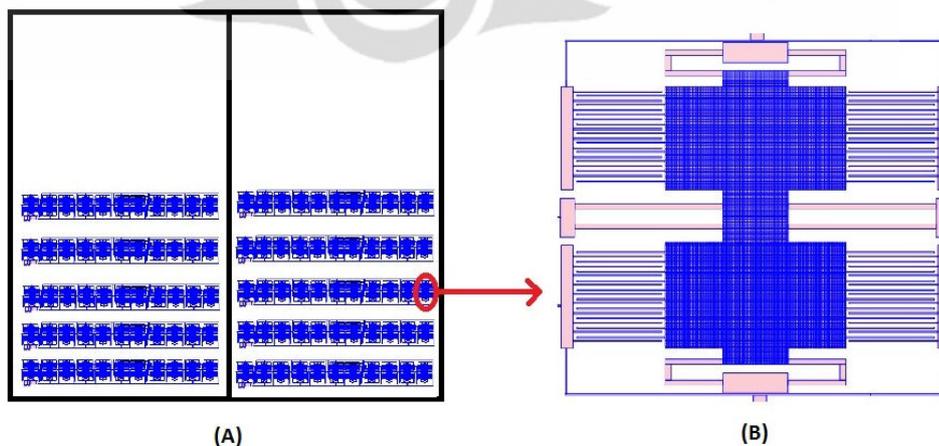


## BAB 3

### PERANCANGAN SENSOR MEMS KAPASITIF

#### 3.1 Tujuan Perancangan

Pada skripsi ini, penulis merancang sebuah sistem sensor MEMS kapasitif yang akan difungsikan sebagai elektroda sensor spektral molekuler seperti pada gambar 3.1. Sensor spektral molekuler ini bekerja dengan memanfaatkan fenomena FEF. Untuk dapat bekerja maka setiap elektroda MEMS digetarkan dengan cara dicatu dengan beda tegangan tertentu. Setelah mencapai frekuensi kerjanya maka salah satu elektroda dari sensor spektral molekuler (bagian kiri atau kanan) akan dicatu dengan tegangan dengan nilai yang sama namun dengan polaritas berbeda sehingga akan timbul beda tegangan antara elektroda kanan dan kiri sensor sehingga akan timbul garis fluks seperti diilustrasikan pada gambar 2.3. Di saat inilah sensor dapat melakukan pengambilan data. Pada gambar 3.1 A terdapat bagian kosong pada bagian atas sensor, bagian ini bisa digunakan sebagai tempat *read-out circuit*. Pada skripsi ini tidak akan dibahas mengenai sensor spektral molekuler ini secara keseluruhan. Pembahasan hanya akan difokuskan pada perancangan elektroda MEMS sensor tersebut.



Gambar 3.1 Gambar rancang bangun utuh sensor (A) dan elektroda MEMS (B).

Spesifikasi yang ingin dicapai pada perancangan elektroda MEMS ini yaitu frekuensi resonansi mekanis sistem sebesar 30 KHz. Pemilihan frekuensi resonansi sebesar ini dikarenakan adanya suatu aturan dasar pada MEMS bahwa besarnya frekuensi mekanik harus sama dengan frekuensi elektrik agar MEMS dapat bekerja. Rentang frekuensi mekanik yang memenuhi syarat ini yaitu 10 KHz, 30 KHz, 50 KHz, 70 KHz, 100 KHz, 300 KHz, 500 KHz, 700 KHz, dsb.

Sementara itu, perancangan sistem ini dibatasi oleh dimensi sistem itu sendiri yang akan dibuat sebesar 1000 um x 1000 um dengan ketebalan 40 um. Dalam perancangan ini digunakan perangkat lunak yang bernama Intellisuite<sup>®</sup>. Perangkat lunak Intellisuite<sup>®</sup> ini digunakan mulai dari perancangan rancang bangun sistem MEMS kapasitif sampai ke tahap pensimulasian beberapa parameter kerja sistem MEMS kapasitif tersebut seperti kapasitansi, frekuensi resonansi mekanis, dan defleksi akibat pencatutan tegangan.

### 3.2 Intellisuite

Intellisuite<sup>®</sup> adalah suatu perangkat lunak bertipe CAD (*Computer Aided Design*) yang menggunakan analisis pendekatan FEM (*Finite Element Methods*), di mana dalam penganalisisannya struktur dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil (*subdomain*) dengan dimensi hingga (*finite*) [1]. Elemen-elemen tersebut terbagi antara satu dengan yang lain melalui titik pertemuan yang disebut *nodes* atau titik-titik nodal untuk mensimulasikan perubahan bentuk (deformasi) dari struktur yang dianalisis [1].

Intellisuite<sup>®</sup> memiliki beberapa modul yang memiliki fungsi yang unik. Masing-masing modul dirancang sedemikian rupa sehingga dapat selaras satu dengan yang lain dalam perancangan suatu sistem MEMS. Setiap modul dapat menangani satu atau beberapa langkah dalam perancangan MEMS sehingga semua modul pada Intellisuite<sup>®</sup> sudah mencukupi dalam hal perancangan MEMS

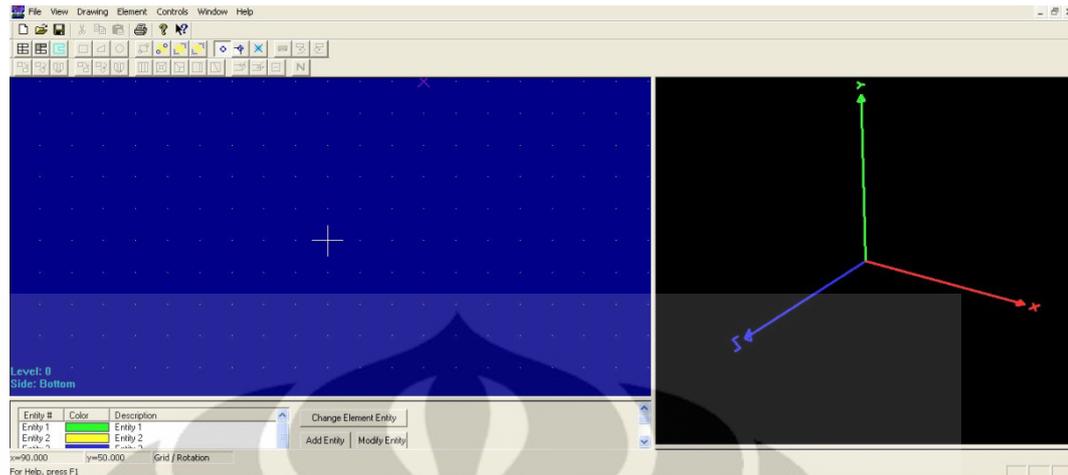
dari tahap perancangan rancang bangun sistem sampai ke uji coba parameter-parameter kerja MEMS. Modul-modul Intellisuite<sup>®</sup> tersebut yaitu:

1. 3DBuilder.
2. AnisE.
3. Electromagnetic.
4. IntelliFab.
5. IntelliMask.
6. MEMaterial.
7. Microfluidic.
8. ThermoElectroMechanical.

Dalam merancang rancang bangun dari MEMS pada skripsi ini, penulis menggunakan dua modul Intellisuite<sup>®</sup>, yaitu 3Dbuilder dan ThermoElectroMechanical.

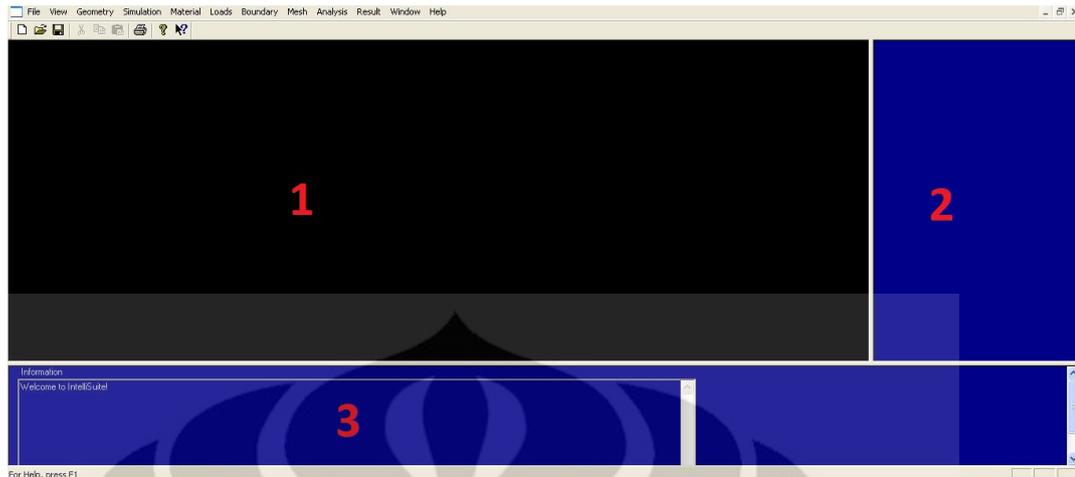
Modul 3Dbuilder digunakan untuk merancang rancangan bangun dasar dari MEMS. Modul ini memiliki dua jendela utama, yaitu jendela di mana perancangan struktur dalam 2D dan jendela yang menampilkan hasil 3D dari rancangan yang dirancang di jendela sebelumnya. Dengan modul ini dimungkinkan untuk merancang suatu struktur MEMS dengan merancang rancang bangunnya dalam 2D terlebih dahulu dan hasil 3D dari rancangan tersebut dapat dilihat di jendela di sebelahnya.

Dalam merancang rancang bangun MEMS pada 3DBuilder, harus diperhatikan perpotongan tiap bagiannya karena jika perpotongannya tidak sesuai maka 3DBuilder akan membacanya sebagai *misaligned* dan hasil perancangan tidak dapat diekspor ke modul analisis seperti Microfluidic, ThermoElectroMechanical, dan Electromagnetic.



Gambar 3.2 Jendela 3DBuilder. Jendela dengan latar biru merupakan jendela tempat perancangan dalam 2D sementara jendela dengan latar hitam merupakan tempat *preview* dalam 3D.

Setelah selesai merancang rancang bangun MEMS dengan 3DBuilder maka langkah selanjutnya adalah menguji parameter-parameter kerja MEMS seperti kapasitansi, frekuensi resonansi mekanis, dll. Modul yang digunakan untuk menguji parameter-parameter kerja tersebut dalam skripsi ini adalah modul ThermoElectroMechanical. Modul ini memiliki jendela kerja seperti gambar 3.2. Jendela dengan warna latar hitam merupakan layar kerja utama di mana struktur MEMS disajikan dalam format 3D sehingga struktur MEMS dapat dirotasi atau digeser secara translasi untuk kepentingan uji coba. Layar kerja dengan warna latar biru dengan nomor 2 merupakan layar di mana nantinya akan terdapat beberapa hasil uji coba parameter seperti *displacement*. Sementara layar kerja dengan warna latar biru dengan nomor 3 berisi informasi mengenai perubahan yang dilakukan pada struktur MEMS.



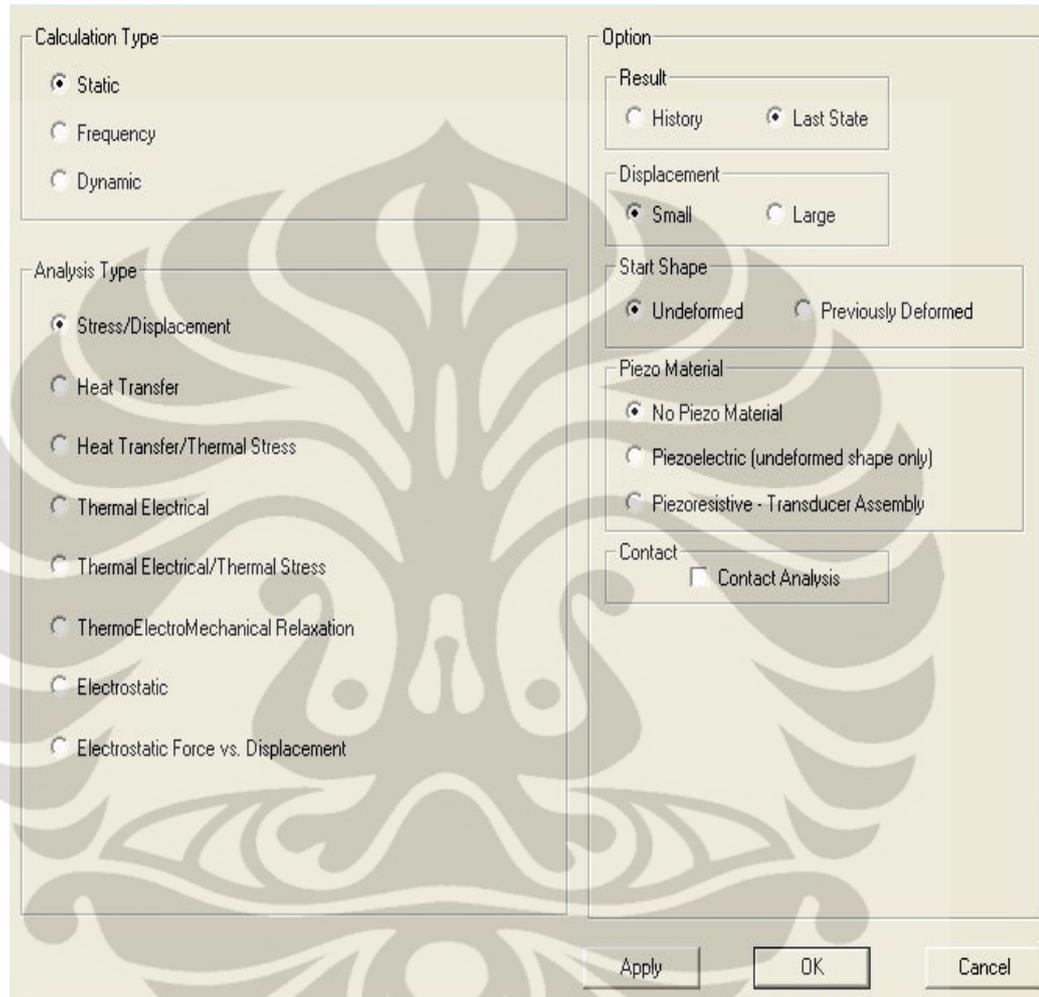
Gambar 3.3 Jendela kerja ThermoElectroMechanical.

Modul ThermoElectroMechanical dapat menganalisis beberapa parameter seperti kapasitansi, frekuensi resonansi mekanis, *stress*, *heat transfer*, dlsb. Pemilihan tipe simulasi ini dapat dilakukan melalui pemilihan menu Simulation pada *tool bar* sehingga akan muncul kotak pilihan seperti gambar 3.3. Dala skripsi ini hanya akan menganalisis parameter-parameter seperti kapasitansi, frekuensi resonansi mekanis, dan pergeseran elektroda sirip MEMS akibat pengaplikasian beda tegangan. Berikut adalah langkah pengesetan dari setiap simulasi pada ThermoElectroMechanical:

1. Analisis kapasitansi: menu Simulation → Static pada Calculation Type → Electrostatic pada Analysis Type.
2. Analisis frekuensi resonansi mekanis: menu Simulation → Frequency pada Calculation Type.
3. Analisis pergeseran elektroda sirip MEMS akibat pengaplikasian beda tegangan: menu Simulation → ThermoElectroMechanical Relaxation pada Calculation Type.

Keakuratan hasil analisis dari modul ThermoElectroMechanical dipengaruhi oleh proses *meshing* dari struktur MEMS. *Meshing* adalah suatu proses pembagian struktur MEMS ke dalam bagian-bagian yang lebih kecil atau disebut juga *mesh*. Semakin kecil ukuran *mesh* maka hasil analisis akan semakin akurat. Ini disebabkan karena sifat analisis Intellisuite<sup>®</sup> yang berbasis FEM (*Finite*

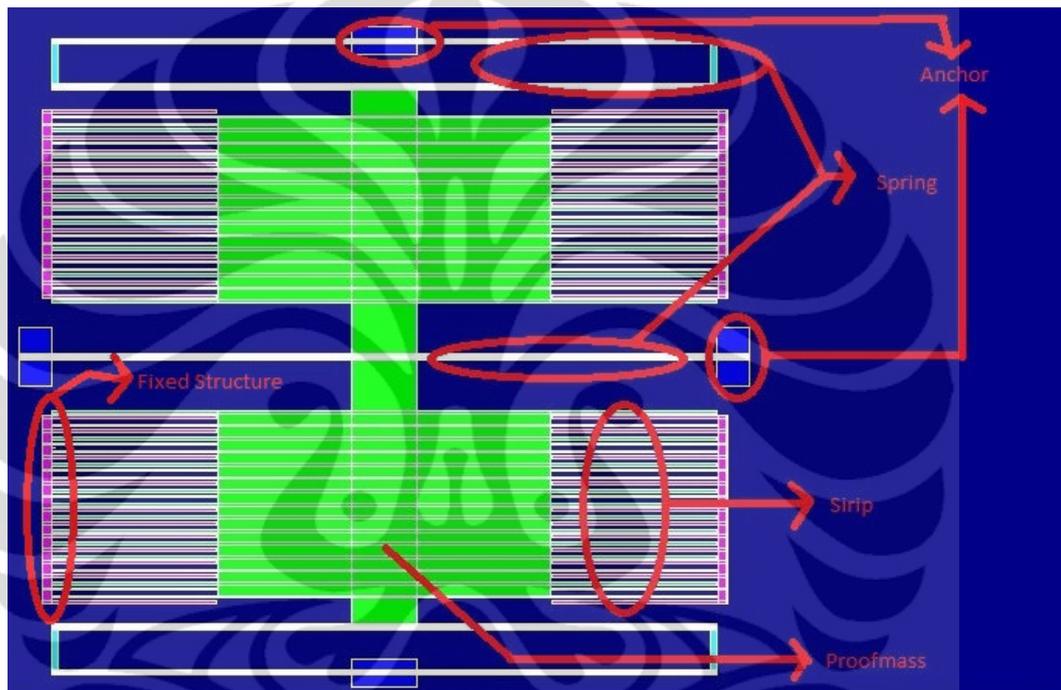
*Element Methods*) yang telah disebutkan sebelumnya. Namun semakin kecil ukuran *mesh* maka akan semakin lama juga waktu yang dibutuhkan untuk melakukan simulasi.



Gambar 3.4 Pilihan tipe simulasi pada ThermoElectroMechanical.

### 3.3 Rancang Bangun Sistem MEMS Kapasitif

Pada skripsi ini akan dirancang sistem sensor MEMS kapasitif yang memiliki rancang bangun *proofmass* berupa *fishbone*. Bentuk rancang bangun MEMS yang akan dirancang dapat dilihat pada gambar 3.5. Pada gambar 3.5, struktur MEMS dapat dibagi menjadi lima bagian besar yaitu *proofmass*, sirip, *spring*, *fixed structure*, dan *anchor*.

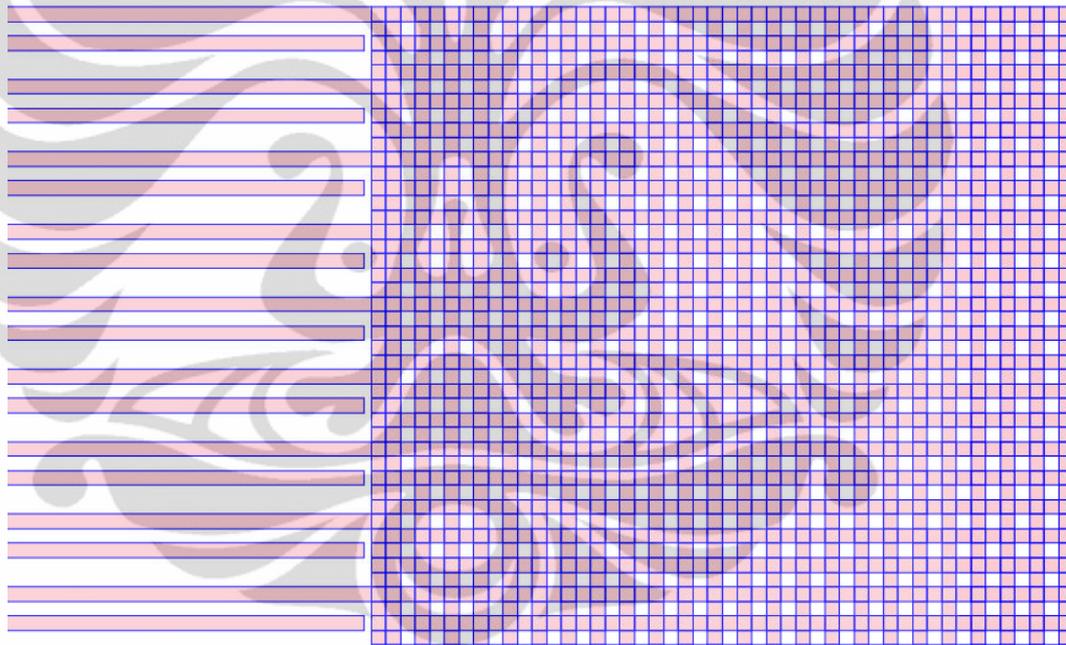


Gambar 3.5 Sensor MEMS kapasitif dengan *proofmass* berbentuk *fishbone*.

#### 3.3.1 Proofmass

Pemilihan tipe *proofmass* pada rancang bangun MEMS pada skripsi ini adalah *fishbone*. Disebut *fishbone* karena pada *proofmass* tipe ini menempel sirip-sirip atau plat elektroda pada sisi sampingnya sehingga menyerupai anatomi tulang ikan. Pemilihan *proofmass* dengan tipe *fishbone* dikarenakan rancang bangun seperti ini memberikan tingkat kinerja yang tertinggi bagi sistem MEMS yang difungsikan sebagai sensor berbasis kapasitansi. Ini disebabkan karena bentuk plat elektrodanya yang berdimensi panjang, ramping, dan berjumlah banyak. Penjelasan akan hal ini akan di jelaskan di bagian 3.3.2.

Pada skripsi ini, *proofmass* didesain dengan memiliki pori. Pada gambar gambar 3.5 dapat dilihat desain *proofmass* yang berpori ini yang didesain dengan modul IntelliMask. Sementara itu, desain *proofmass* yang dipakai untuk analisis adalah desain *proofmass* tanpa pori yang terdapat pada gambar 3.5. Penyebab penggunaan desain tanpa pori dalam analisis karena desain berpori akan sangat membebani sistem, mulai dari perancangan di modul 3DBuilder sampai pada saat mengekspor struktur hasil rancangan di modul 3DBuilder ke modul ThermoElectroMechanical untuk dianalisis dan tidak jarang juga sistem dapat mengalami *crash*.



Gambar 3.6 Desain *proofmass* yang berpori.

Perbedaan antara desain berpori dengan tanpa pori tentunya akan menghasilkan hasil simulasi yang berbeda. Perbedaan ini disebabkan karena untuk dimensi dan jenis material yang sama, nilai massa desain berpori akan lebih ringan dibandingkan dengan massa desain tanpa pori sehingga akan berpengaruh pada kinerja mekanisnya, dalam hal ini adalah nilai frekuensi resonansi mekanis. Oleh karena itu dalam simulasi pada modul ThermoElectroMechanical di skripsi ini dilakukan sedikit penyesuaian pada nilai rho ( $\rho$ ) material yang digunakan.

Material yang digunakan pada struktur MEMS ini yaitu silikon dengan metode pembuatan Czochralski dengan orientasi kristal 100.

Berikut adalah perhitungan penyesuaian nilai rho ( $\rho$ ) material pada simulasi:

$$m_f = m_b \quad (3.1)$$

di mana  $m_f$  adalah massa proofmass dengan desain tanpa pori dan  $m_b$  adalah massa proofmass dengan desain berpori. Persamaan (3.1) bertujuan agar desain tanpa pori dapat menghasilkan nilai frekuensi resonansi mekanis yang sama dengan desain berpori. Volume desain tanpa pori lebih besar dibandingkan volume desain berpori sehingga densitas desain tanpa pori harus diturunkan agar bisa sesuai dengan persamaan (3.1). Nilai densitas desain tanpa pori dapat dicapai melalui persamaan berikut:

$$\rho_f v_f = \rho_b v_b \quad (3.2)$$

sehingga

$$\rho_f = \frac{\rho_b v_b}{v_f} \quad (3.3)$$

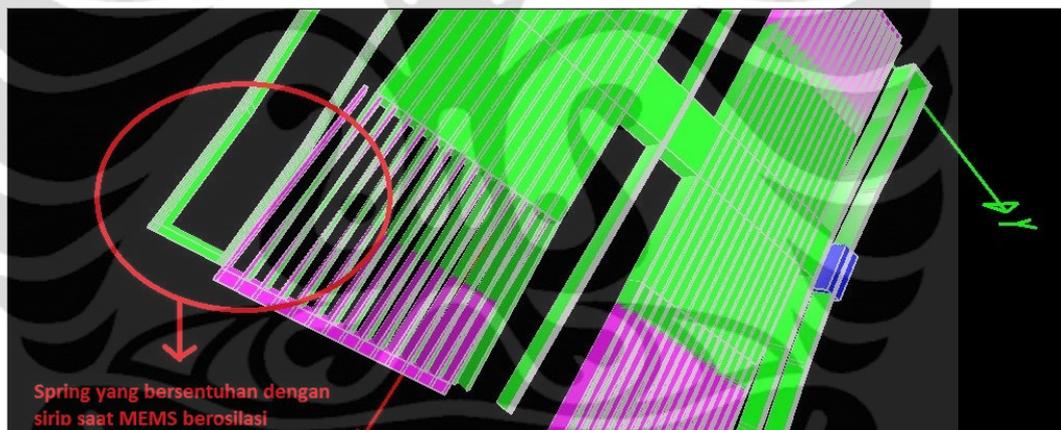
Dengan nilai  $\rho_b = 2328 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $v_b = 118112 \times 10^{-16} \text{ m}^3$ ,  $v_f = 14736 \times 10^{-15} \text{ m}^3$ , maka nilai  $\rho_f = 1865,938 \text{ kgm}^{-3}$ . Nilai  $\rho_f$  inilah yang dimasukkan menjadi nilai rho ( $\rho$ ) material MEMS pada simulasi pada skripsi ini.

Pada gambar 3.5 pada bagian kedua ujung struktur MEMS di bawah masing-masing spring terdapat suatu struktu menonjol yang yang menjadi penghubung spring dengan proofmass. Pada skripsi ini struktur tersebut disebut *neck*. Gambar 3.7 memperlihatkan gambaran jelas mengenai *neck*.



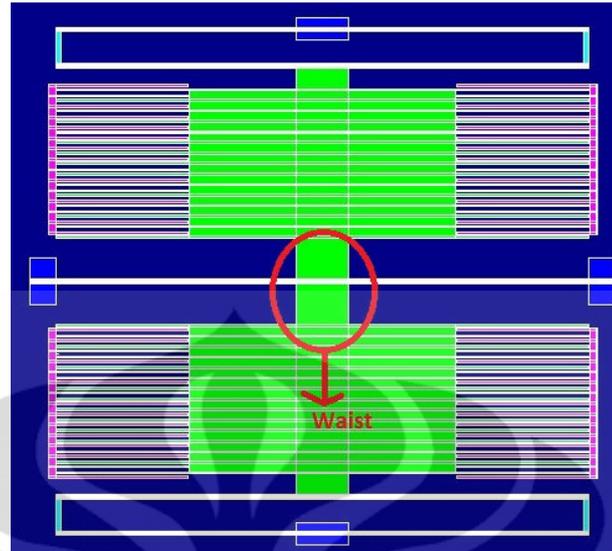
Gambar 3.7 Gambar 3.6 Neck.

Pada skripsi ini, *neck* memiliki dimensi 100 um x 40 um x 40 um (p x l x t). dalam perancangan ini, penentuan dimensi *neck* sangat berpengaruh karena jika lebar *neck* dibuat terlalu kecil maka saat sistem mengalami osilasi terdapat kemungkinan *spring* akan bersinggungan dengan *proofmass* dan jika ini terjadi maka akan terjadi kerusakan dengan pada struktur MEMS, terutama pada *spring*.



Gambar 3.8 Spring yang mengenai sirip saat MEMS berosilasi akibat ukuran lebar *neck* yang terlalu kecil.

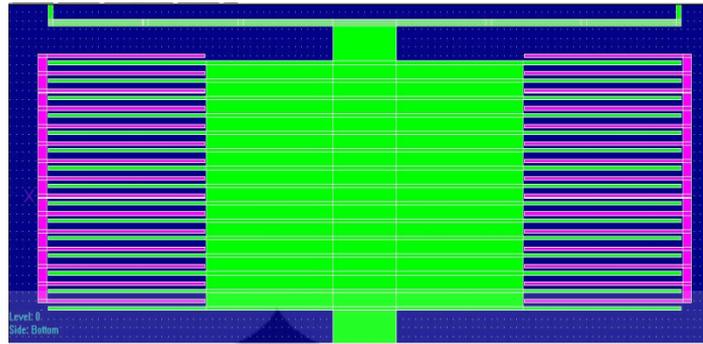
Pada struktur MEMS pada perancangan ini juga terdapat bagian yang berbentuk batang penghubung antara *proofmass* atas dengan *proofmass* bawah dan struktur ini juga menjadi tempat menempelnya spring tengah. Pada perancangan ini, bagian ini disebut *waist*. *Waist* ini juga masih merupakan bagian dari *proofmass*. *Waist* pada perancangan ini memiliki dimensi 164 um x 100 um x 40 um (p x l x t).



Gambar 3.9 *Waist*.

### 3.3.2 Sirip

Struktur MEMS pada skripsi ini memiliki sirip berjumlah 60 pasang (60 sirip dinamis dan 60 sirip statis). Dimensi sirip pada perancangan MEMS dalam skripsi ini yaitu  $250 \text{ um} \times 4 \text{ um} \times 40 \text{ um}$  ( $p \times l \times t$ ). Terdapat dua jenis sirip pada perancangan ini berdasarkan kebebasan pergerakannya yaitu sirip statis dan sirip dinamis. Kedua jenis sirip ini memiliki dimensi yang sama. Sirip dinamis menempel pada proofmass sedangkan sirip statis menempel pada struktur statis. Dapat dilihat pada gambar 3.9 bahwa sirip dinamis berwarna hijau dan sirip statis berwarna magenta. Jika dilihat pada gambar 3.9 maka dapat diperhatikan bahwa sirip statis dengan sirip dinamis memiliki dua jenis jarak yaitu jarak terdekat sebesar  $4 \text{ um}$  dan jarak terjauh sebesar  $18 \text{ um}$ .



Gambar 3.10 Sirip pada *proofmass* tipe *fish bone*.

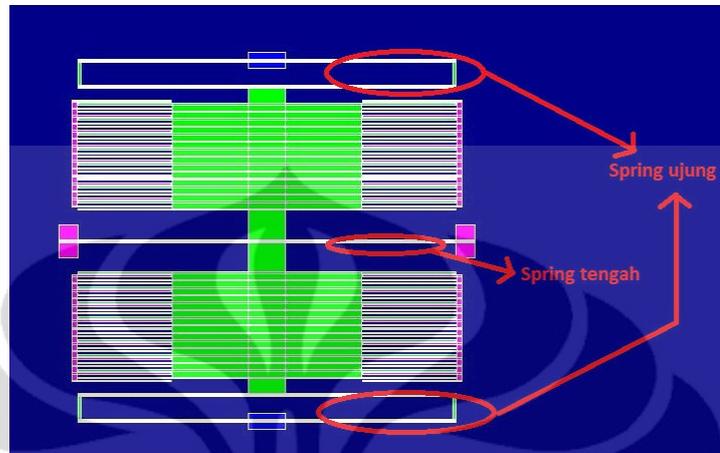
Seperti yang telah dijelaskan pada Bab 2 bahwa sensor MEMS yang berbasis kapasitansi memiliki kemampuan dalam mengindera lingkungan sekitarnya atau objek target berdasarkan perubahan kapasitansi sistem akibat bekerjanya gaya luar pada sistem MEMS. Pada MEMS yang memiliki *proofmass* berbentuk *fishbone*, saat gaya luar bekerja pada MEMS, *proofmass* akan bergerak sehingga sirip yang menempel padanya akan ikut bergerak, sementara sirip yang menempel pada struktur statis akan tetap diam. Di saat itulah terjadi perubahan kapasitansi akibat perubahan jarak antara sirip dinamis dan sirip statis. Perubahan kapasitansi ini akan diakumulasi sesuai dengan banyaknya pasangan sirip atau plat elektroda pada struktur MEMS.

Struktur *proofmass* bertipe *fishbone* dengan plat elektroda dengan dimensi panjang dan ramping namun berjumlah banyak lebih menguntungkan daripada struktur sepasang plat elektroda sejajar dengan ukuran besar karena akan mengurangi nilai *squeeze film damping* seperti yang dibuktikan pada persamaan (2.58).

### 3.3.3 Spring

Pada perancangan ini, terdapat dua macam *spring* berdasarkan letaknya pada struktur MEMS yaitu *spring* ujung dan *spring* tengah. *Spring* ujung berjenis *non-rigid truss* dengan tipe *straight truss* sementara *spring* tengah berbentuk batang sederhana. Pada skripsi ini akan dibahas mengenai pengaruh ketebalan dan

panjang *spring* terhadap besarnya konstanta pegas ( $k$ ) dan frekuensi resonansi mekanis ( $f_R$ ) MEMS.



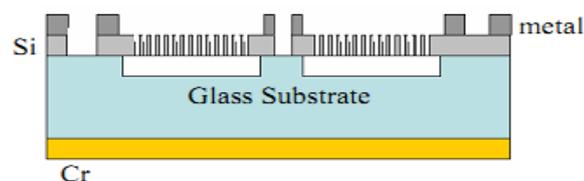
Gambar 3.11 Posisi spring pada struktur MEMS.

### 3.3.4 Fixed Structure

*Fixed structure* adalah tempat di mana spring statis melekat. *Fixed structure* nantinya pada proses fabrikasi akan ditempel menempel pada substrat wafer.

### 3.3.5 Anchor

*Anchor* adalah suatu bagian yang memungkinkan struktur MEMS tertahan saat struktur tersebut mengalami osilasi akibat pengaruh gaya luar. *Anchor* ini juga yang menahan struktur MEMS secara keseluruhan melayang di atas cekungan yang dibuat pada substrat wafer. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.11. Cekungan ini yang memungkinkan struktur MEMS bisa bergerak atau berosilasi .



Gambar 3.12 Penampang samping MEMS di atas substrat wafer [2].

## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

#### 4.1 Pengaruh Dimensi Spring Terhadap Nilai Konstanta Pegas

Pada bagian ini akan dibahas hubungan antara dimensi *spring* dengan nilai konstanta pegas dari MEMS. Untuk dapat melihat hubungan ini maka salah satu parameter dimensi *spring* MEMS akan divariasikan sementara parameter yang lainnya dibuat tetap. Dimensi *spring* yang akan divariasikan yaitu lebar *spring* ujung, panjang *spring* ujung, dan lebar *spring* tengah.

##### 4.1.1 Lebar Spring Tengah Sebesar 2 mikrometer

Tabel 4.1 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang spring ujung 450 mikrometer.

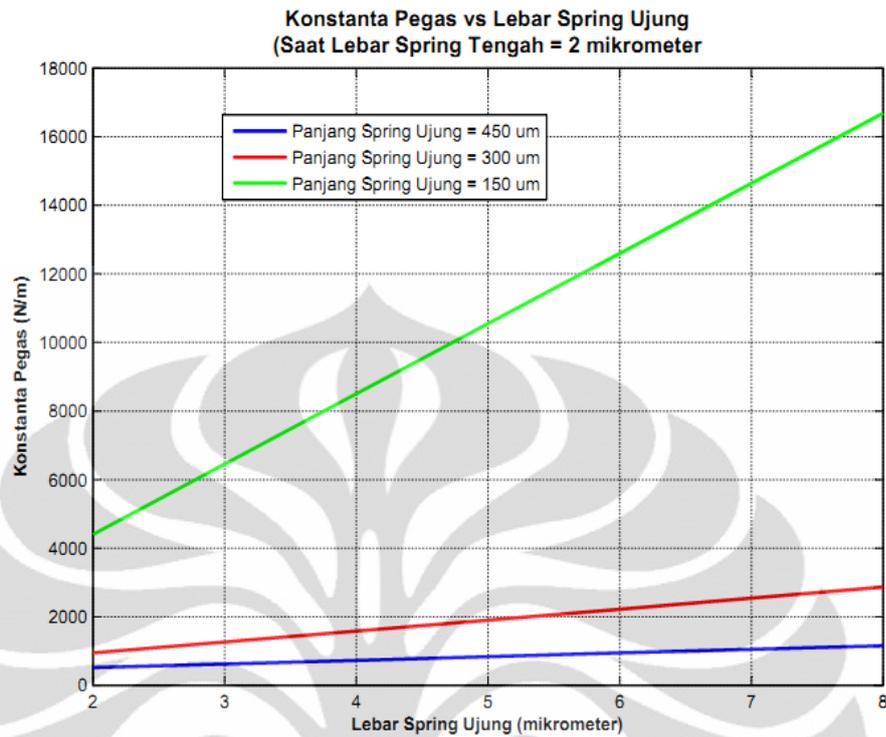
Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Konstanta Pegas (N/m)
2	513
4	724,49
6	936,45
8	1148,4

Tabel 4.2 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang *spring* ujung 300 mikrometer.

Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Konstanta Pegas (N/m)
2	940,07
4	1579,55
6	2219,03
8	2858,05

Tabel 4.3 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang *spring* ujung 150 mikrometer.

Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Konstanta Pegas (N/m)
2	4397,26
4	8493,93
6	12590,61
8	16687,28



Gambar 4.1 Grafik konstanta pegas vs lebar *spring* ujung saat lebar *spring* tengah sebesar 2 mikrometer.

#### 4.1.2 Lebar Spring Tengah Sebesar 4 mikrometer

Tabel 4.4 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang *spring* ujung 450 mikrometer.

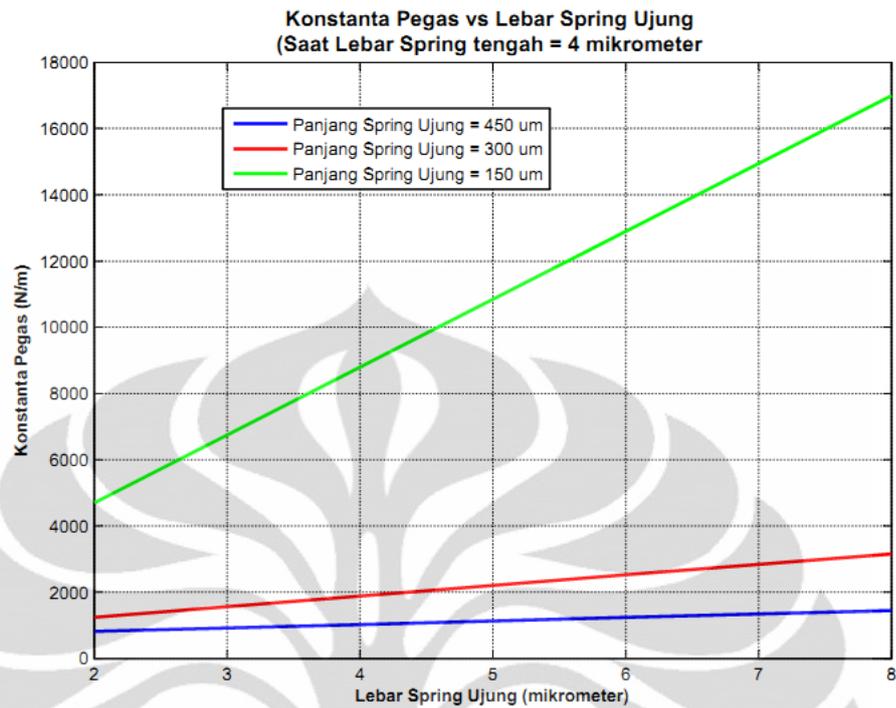
Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Konstanta Pegas (N/m)
2	813,15
4	1025,09
6	1237,05
8	1448,99

Tabel 4.5 Tabel pengaruh lebar spring ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar spring tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang spring ujung 300 mikrometer.

<b>Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)</b>	<b>Konstanta Pegas (N/m)</b>
2	1240,67
4	1880,15
6	2519,62
8	3159,1

Tabel 4.6 Tabel 4.6 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang *spring* ujung 150 mikrometer.

<b>Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)</b>	<b>Konstanta Pegas (N/m)</b>
2	4697,86
4	8794,53
6	12891,21
8	16987,88



Gambar 4.2 Grafik konstanta pegas vs lebar *spring* ujung saat lebar *spring* tengah sebesar 4 mikrometer.

#### 4.1.3 Lebar Spring Tengah Sebesar 6 mikrometer

Tabel 4.7 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang *spring* ujung 450 mikrometer.

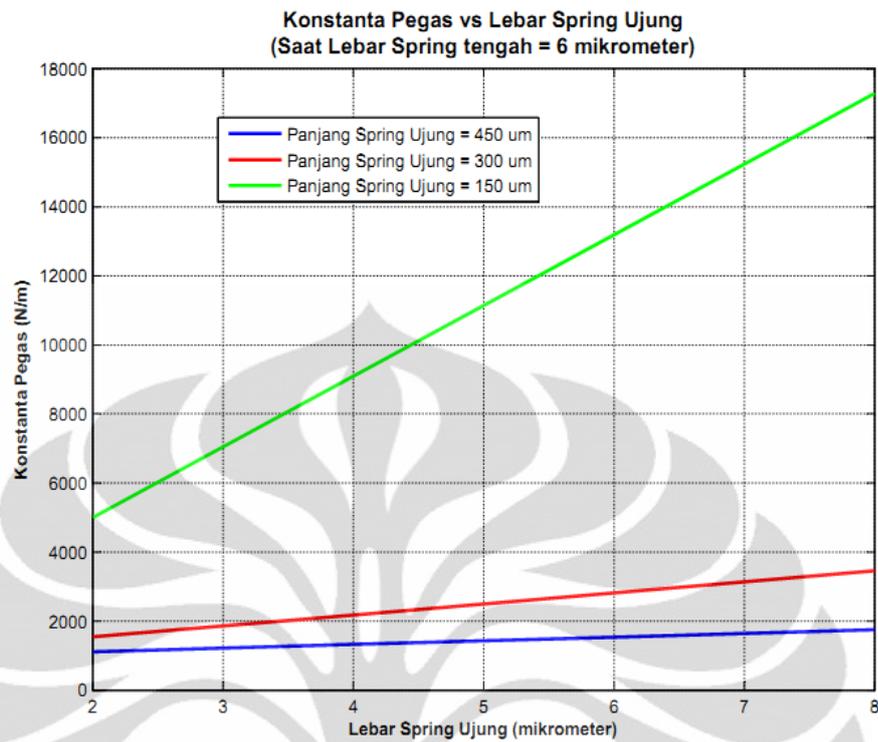
Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Konstanta Pegas (N/m)
2	1113,74
4	1325,69
6	1537,65
8	1749,59

Tabel 4.8 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang *spring* ujung 300 mikrometer.

Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Konstanta Pegas (N/m)
2	1541,27
4	2180,75
6	2820,22
8	3459,69

Tabel 4.9 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang *spring* ujung 150 mikrometer.

Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Konstanta Pegas (N/m)
2	4998,46
4	9095,13
6	13191,8
8	17288,47



Gambar 4.3 Grafik konstanta pegas vs lebar *spring* ujung saat lebar *spring* tengah sebesar 6 mikrometer.

#### 4.1.4 Lebar Spring Tengah Sebesar 8 mikrometer

Tabel 4.10 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang *spring* ujung 450 mikrometer.

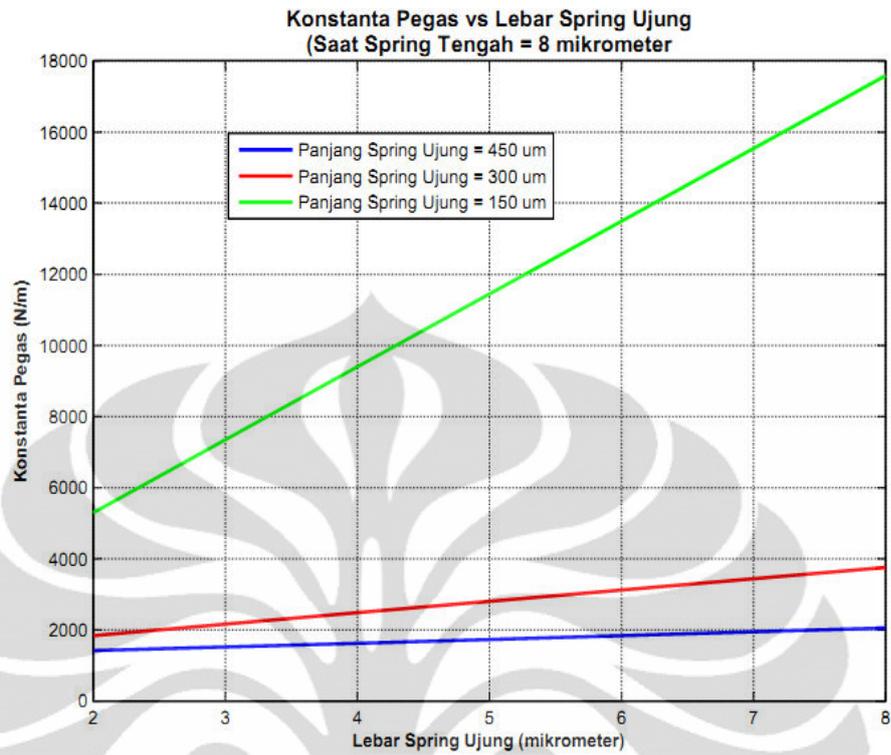
Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Konstanta Pegas (N/m)
2	1414,34
4	1626,29
6	1838,25
8	2050,19

Tabel 4.11 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang *spring* ujung 300 mikrometer.

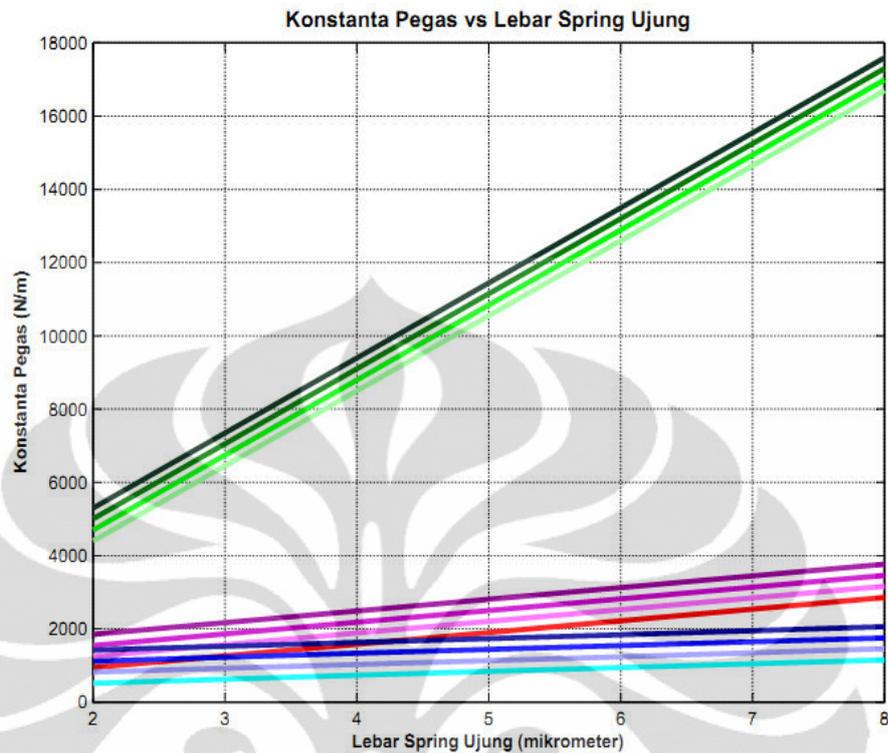
<b>Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)</b>	<b>Konstanta Pegas (N/m)</b>
2	1841,86
4	2481,34
6	3120,82
8	3760,29

Tabel 4.12 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai konstanta pegas saat lebar *spring* tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang *spring* ujung 150 mikrometer.

<b>Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)</b>	<b>Konstanta Pegas (N/m)</b>
2	5299,06
4	9395,73
6	13492,4
8	17589,07



Gambar 4.4 Grafik konstanta pegas vs lebar *spring* ujung saat lebar *spring* tengah sebesar 8 mikrometer.



Gambar 4.5 Grafik lengkap konstanta pegas vs dimensi *spring*.

- Lebar Spring Tengah=2 um; Panjang Spring Ujung=450 um
- Lebar Spring Tengah=2 um; Panjang Spring Ujung=300 um
- Lebar Spring Tengah=2 um; Panjang Spring Ujung=150 um
- Lebar Spring Tengah=4 um; Panjang Spring Ujung=450 um
- Lebar Spring Tengah=4 um; Panjang Spring Ujung=300 um
- Lebar Spring Tengah=4 um; Panjang Spring Ujung=150 um
- Lebar Spring Tengah=6 um; Panjang Spring Ujung=450 um
- Lebar Spring Tengah=6 um; Panjang Spring Ujung=300 um
- Lebar Spring Tengah=6 um; Panjang Spring Ujung=150 um
- Lebar Spring Tengah=8 um; Panjang Spring Ujung=450 um
- Lebar Spring Tengah=8 um; Panjang Spring Ujung=300 um
- Lebar Spring Tengah=8 um; Panjang Spring Ujung=150 um

Gambar 4.6 Keterangan gambar 4.5.

Gambar 4.5 merupakan penggabungan dari gambar 4.1, 4.2, 4.3, dan 4.4. Jika pada gambar 4.1, 4.2, 4.3, dan 4.4 hanya terlihat efek dari dimensi *spring* MEMS terhadap besarnya konstanta pegas MEMS secara individual, maka dalam

gambar 4.5 dapat dilihat pengaruhnya secara menyeluruh. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa parameter dimensi yang akan dianalisis yaitu lebar *spring* ujung, panjang *spring* ujung, dan lebar *spring* tengah.

Mengacu ke gambar 4.5 bahwa semakin lebar *spring* ujung maka semakin tinggi juga nilai konstanta pegas MEMS. Hal ini juga berlaku jika nilai lebar *spring* tengah diperbesar. Sementara itu, jika panjang *spring* ujung dikurangi maka nilai konstanta pegas MEMS akan meningkat. Dari data ini dapat disimpulkan bahwa konstanta pegas berbanding lurus dengan lebar *spring*, baik itu *spring* ujung maupun *spring* tengah. Sementara itu, konstanta pegas berbanding terbalik dengan panjang dari *spring*, dalam hal ini yang diuji dalam skripsi ini adalah *spring* ujung.

Dapat dilihat pada gambar 4.5 untuk nilai lebar *spring* ujung dan *spring* tengah yang sama, terdapat peningkatan nilai konstanta pegas yang sangat signifikan setiap pengurangan nilai panjang *spring* ujung. Hal ini sesuai dengan persamaan (2.52) di mana nilai  $k_x$  berbanding terbalik dengan pangkat tiga dari panjang *spring* seperti dapat dilihat pada persamaan (4.1) berikut:

$$k_x \approx \frac{1}{L_b^3} \quad (4.1)$$

Sementara itu, peningkatan nilai konstanta pegas yang tidak terlalu signifikan saat nilai lebar *spring* dinaikkan, baik itu lebar *spring* ujung maupun lebar *spring* tengah, juga dapat dijelaskan melalui persamaan (2.52). Pada persamaan (2.52), konstanta pegas berbanding lurus dengan momen inersia dari *spring* seperti dapat dilihat pada persamaan (4.2) berikut:

$$k_x \approx I \quad (4.2)$$

Persamaan (2.52) juga dapat disederhanakan ke persamaan (2.45) untuk dapat melihat lebih jelas hubungan antara lebar *spring* dengan konstanta pegas. Pada

persamaan (2.45) terlihat bahwa konstanta pegas berbanding lurus dengan lebar *spring* seperti dapat dilihat dalam persamaan (4.3) berikut:

$$k \approx w \quad (4.3)$$

Jika persamaan (4.1) dibandingkan dengan persamaan (4.3) maka dapat terlihat dengan jelas alasan mengapa terjadi kenaikan konstanta pegas yang sangat signifikan setiap penurunan panjang *spring* ujung dibandingkan dengan kenaikan lebar *spring*. Dengan fakta ini maka semakin lebar dan pendek dimensi *spring* suatu MEMS maka akan semakin tinggi juga konstanta pegasnya.

#### **4.2 Pengaruh Dimensi Spring Terhadap Frekuensi Resonansi Mekanis**

Pada sub-bab 4.1 telah dijelaskan mengenai pengaruh dimensi *spring* terhadap nilai konstanta pegas MEMS. Perubahan dimensi *spring* mempengaruhi secara langsung nilai konstanta pegas dan perubahan konstanta pegas berpengaruh langsung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis MEMS, sehingga dengan kata lain perubahan dimensi *spring* akan berpengaruh secara langsung terhadap frekuensi resonansi mekanis MEMS. Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai pengaruh perubahan dimensi *spring* terhadap frekuensi resonansi mekanis MEMS. Parameter dimensi *spring* sama dengan yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.1.

#### 4.2.1 Lebar Spring Tengah Sebesar 2 mikrometer

Tabel 4.13 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang *spring* ujung 450 mikrometer.

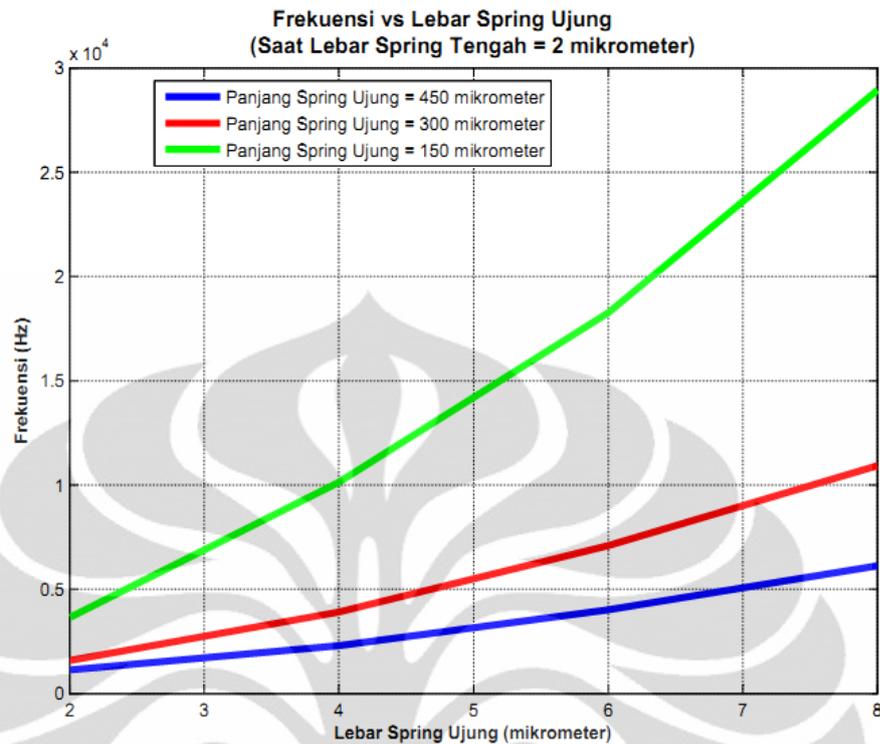
Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)
2	1120.05
4	2291.12
6	4020.51
8	6126.54

Tabel 4.14 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang *spring* ujung 300 mikrometer.

Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)
2	1578.81
4	3898.41
6	7085.77
8	10917.1

Tabel 4.15 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 2 mikrometer dan panjang *spring* ujung 150 mikrometer.

Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)
2	3637.94
4	10127.5
6	18270.9
8	28941.9



Gambar 4.7 Grafik frekuensi vs lebar *spring* ujung saat lebar *spring* tengah sebesar 2 mikrometer.

#### 4.2.2 Lebar Spring Tengah Sebesar 4 mikrometer

Tabel 4.16 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang *spring* ujung 450 mikrometer.

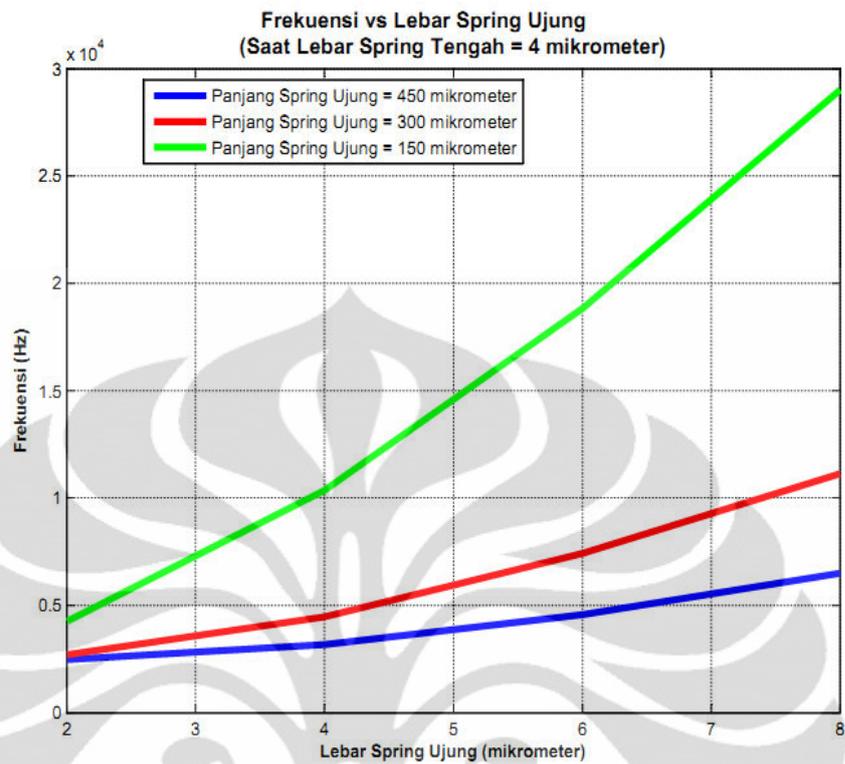
Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)
2	2463.58
4	3164.94
6	4568.73
8	6493.53

Tabel 0.17 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang *spring* ujung 300 mikrometer.

<b>Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)</b>	<b>Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)</b>
2	2704.84
4	4468.48
6	7408.31
8	11122.1

Tabel 4.18 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 4 mikrometer dan panjang *spring* ujung 150 mikrometer.

<b>Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)</b>	<b>Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)</b>
2	4248.29
4	10353.2
6	18831
8	28998



Gambar 4.8 Grafik frekuensi vs lebar *spring* ujung saat lebar *spring* tengah sebesar 4 mikrometer.

#### 4.2.3 Lebar Spring Tengah Sebesar 6 mikrometer

Tabel 4.19 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang *spring* ujung 450 mikrometer.

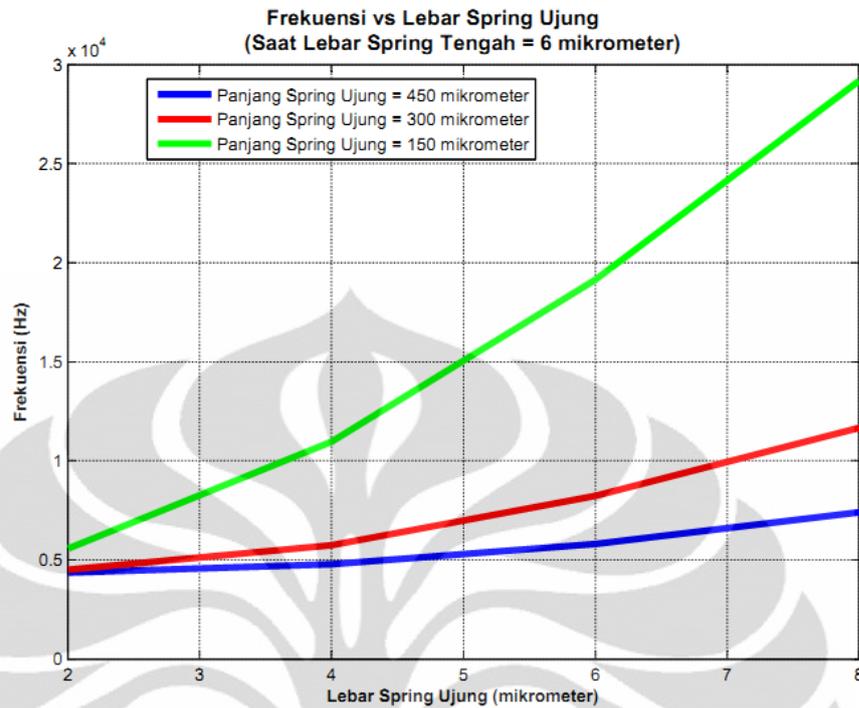
Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)
2	4365.84
4	4784.92
6	5798.84
8	7400.94

Tabel 4.20 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang *spring* ujung 300 mikrometer.

Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)
2	4509.73
4	5734.36
6	8224.86
8	11672.4

Tabel 4.21 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 6 mikrometer dan panjang *spring* ujung 150 mikrometer.

Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)
2	5574.54
4	10953.1
6	19152.1
8	29188.7



Gambar 4.9 Grafik frekuensi vs lebar *spring* ujung saat lebar *spring* tengah sebesar 6 mikrometer.

#### 4.2.4 Lebar Spring Tengah Sebesar 8 mikrometer

Tabel 4.22 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang *spring* ujung 450 mikrometer.

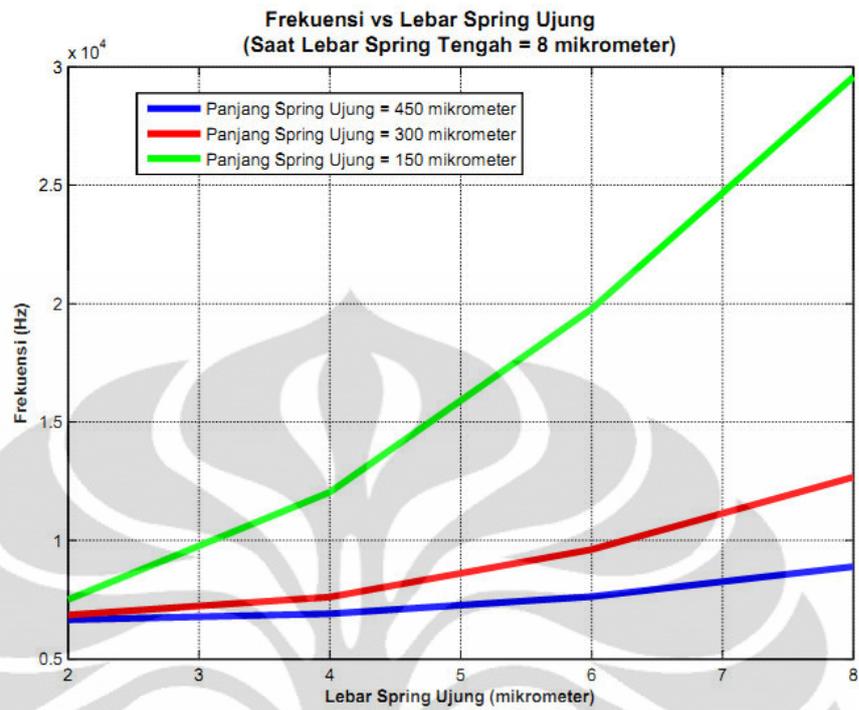
Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)	Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)
2	6645.31
4	6913.63
6	7635.95
8	8900.05

Tabel 4.23 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang *spring* ujung 300 mikrometer.

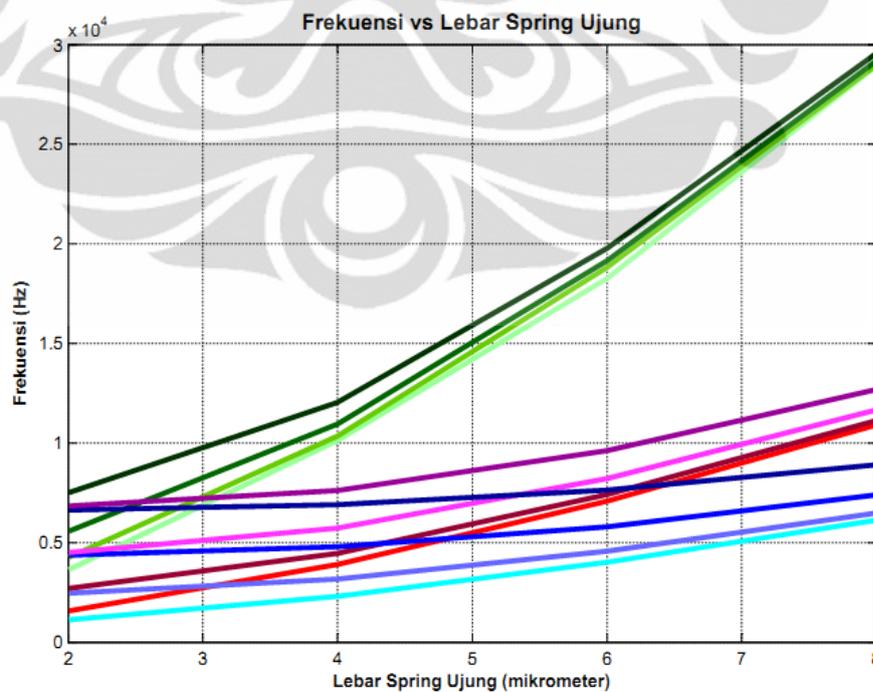
<b>Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)</b>	<b>Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)</b>
2	6849.21
4	7607.79
6	9613.1
8	12676.5

Tabel 4.24 Tabel pengaruh lebar *spring* ujung terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis saat lebar *spring* tengah sebesar 8 mikrometer dan panjang *spring* ujung 150 mikrometer.

<b>Lebar <i>Spring</i> Ujung (mikrometer)</b>	<b>Frekuensi Resonansi Mekanis (Hz)</b>
2	7501.97
4	12035.6
6	19772.7
8	29576.2



Gambar 4.10 Grafik frekuensi vs lebar *spring* ujung saat lebar *spring* tengah sebesar 8 mikrometer.



Gambar 4.11 Grafik lengkap frekuensi vs dimensi *spring*.

- Lebar Spring Tengah=2 um; Panjang Spring Ujung=450 um
- Lebar Spring Tengah=2 um; Panjang Spring Ujung=300 um
- Lebar Spring Tengah=2 um; Panjang Spring Ujung=150 um
- Lebar Spring Tengah=4 um; Panjang Spring Ujung=450 um
- Lebar Spring Tengah=4 um; Panjang Spring Ujung=300 um
- Lebar Spring Tengah=4 um; Panjang Spring Ujung=150 um
- Lebar Spring Tengah=6 um; Panjang Spring Ujung=450 um
- Lebar Spring Tengah=6 um; Panjang Spring Ujung=300 um
- Lebar Spring Tengah=6 um; Panjang Spring Ujung=150 um
- Lebar Spring Tengah=8 um; Panjang Spring Ujung=450 um
- Lebar Spring Tengah=8 um; Panjang Spring Ujung=300 um
- Lebar Spring Tengah=8 um; Panjang Spring Ujung=150 um

Gambar 4.12 Keterangan gambar 4.11.

Gambar 4.11 merupakan penggabungan dari gambar 4.7, 4.7, 4.9, dan 4.10. Pada gambar ini akan terlihat pengaruh dimensi *spring* secara keseluruhan terhadap nilai frekuensi resonansi mekanis MEMS dibandingkan dengan gambar 4.7, 4.7, 4.9, dan 4.10 yang hanya menampilkan pengaruh dimensi *spring* MEMS secara individual. Sub-bab ini merupakan kelanjutan dari analisis sub-bab 4.1. Jika pada sub-bab 4.1 telah dijelaskan bahwa semakin tebal dan pendek dimensi *spring* maka nilai konstanta pegas akan meningkat, maka sesuai persamaan (2.42) nilai frekuensi resonansi mekanis MEMS juga akan meningkat. Hubungan antara nilai konstanta pegas dengan nilai frekuensi resonansi mekanis dapat dilihat dipersamaan (4.4) berikut:

$$f_R \approx \sqrt{k} \quad (4.4)$$

Peningkatan nilai frekuensi resonansi mekanis juga mengalami sifat yang sama dengan peningkatan nilai konstanta pegas seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.1, yaitu meningkat secara drastis saat *spring* diperpendek dibandingkan saat *spring* ditambah ketebalannya.

Hubungan antara nilai frekuensi resonansi mekanis dengan panjang *spring* dapat dicari dengan mensubstitusikan persamaan (4.1) ke persamaan (4.4) sehingga menghasilkan persamaan (4.5) berikut:

$$f_R \approx \frac{1}{L_b^{3/2}} \quad (4.5)$$

Sementara itu, hubungan antara frekuensi resonansi mekanis dengan lebar *spring* dapat dicari dengan mensubstitusikan persamaan (4.3) ke persamaan (4.4) sehingga menghasilkan persamaan (4.6) berikut:

$$f_R \approx w \quad (4.6)$$

Sehingga bisa disimpulkan bahwa untuk menghasilkan MEMS dengan frekuensi resonansi mekanis yang tinggi dapat ditempuh dengan mendesain *spring* MEMS dengan ukuran yang setebal dan sependek mungkin.

Namun dalam kenyataannya, untuk mencapai nilai frekuensi resonansi mekanis yang tinggi, ketebalan *spring* MEMS tidak dapat dibuat setebal mungkin atau ukuran panjang *spring* MEMS tidak dapat dibuat sependek mungkin. Terdapat batasan yang membatasi hal ini, yaitu daerah saturasi. Daerah saturasi yaitu daerah di mana perbandingan antara lebar dan panjang *spring* tidak lagi proportional sehingga peningkatan nilai ketebalan atau penurunan panjang *spring* hanya berkontribusi sedikit terhadap kenaikan nilai frekuensi resonansi mekanis. Sementara itu, daerah di mana perbandingan antara lebar dan panjang *spring* masih proportional sehingga perubahan dimensi *spring* yang dapat memberikan perubahan yang signifikan terhadap perubahan frekuensi resonansi mekanis disebut daerah optimal.

Sebagai pemisalan yaitu saat sebuah *spring* memiliki ketebalan yang hampir sebanding dengan panjangnya maka kemampuan *spring* tersebut untuk beresilasi akan menurun dan bahkan mendekati nol. Ini bisa dianalogikan dengan papan loncat pada sebuah kolam renang. Saat perbandingan antara ketebalan dan panjang papan masih dalam daerah optimal maka papan tersebut masih dapat beresilasi dengan maksimal. Namun saat ketebalan papan ditingkatkan sehingga mendekati ukuran panjangnya maka papan tersebut akan menjadi terlalu kaku untuk beresilasi. Pada skripsi ini tidak dibahas lebih jauh lagi mengenai daerah saturasi dan daerah optimal dari perancangan MEMS ini.

### 4.3 Desain Akhir Perancangan MEMS

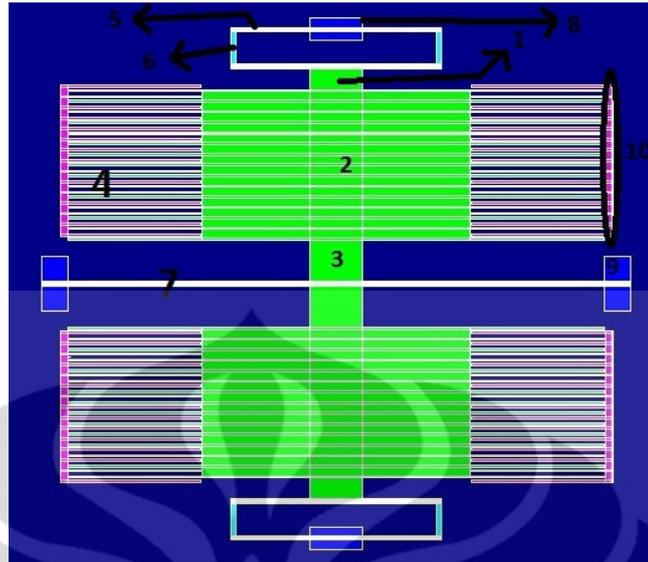
Pada sub-bab 3.1 disebutkan bahwa tujuan akhir dari perancangan sensor MEMS kapasitif pada skripsi ini yaitu sistem MEMS yang bekerja pada frekuensi resonansi mekanis sebesar 30 KHz. Selain itu disebutkan pula bahwa terdapat batasan dalam perancangan yaitu dimensi MEMS yang berukuran 1000 um x 1000 um x 40 um (p x l x t).

Berdasarkan hal tersebut maka mengacu ke persamaan (2.42) ada dua variabel yang bisa divariasikan untuk mencapai tujuan perancangan, yaitu massa (m) MEMS dan konstanta pegas (k) yang direpresentasikan dalam dimensi *spring*. Dalam perancangan ini, variabel massa tidak divariasikan oleh penulis karena kontribusi massa kepada perubahan nilai frekuensi resonansi mekanis tidaklah signifikan dikarenakan MEMS yang dirancang memiliki massa pada kisaran  $2,76 \times 10^{-8}$  kg. Dengan nilai sekecil itu dan mengacu ke persamaan (2.42) maka massa MEMS haruslah dikurangi untuk meningkatkan  $f_R$ . Namun, berdasarkan beberapa percobaan yang dilakukan penulis didapat bahwa peningkatan  $f_R$  tidaklah signifikan. Dengan mengacu ke fakta ini maka penulis memilih variabel dimensi *spring* untuk divariasikan untuk mencapai target perancangan.

Dengan melihat tabel 4.24, gambar 4.10, dan 4.11 maka dapat dilihat dengan jelas bahwa dengan membuat ketebalan *spring* ujung dan *spring* tengah sebesar 8 um dan panjang *spring* ujung 150 um dapat dicapai MEMS dengan  $f_R$  sebesar 29576.2 Hz. Untuk mencapai  $f_R$  sebesar 30 KHz maka penulis mengurangi panjang *spring* ujung menjadi 146 um dan setelah disimulasikan pada Intellisuite<sup>®</sup> maka berhasil didapat sistem MEMS dengan  $f_R$  sebesar 30459.2 Hz, sehingga tingkat error  $f_R$  sebesar 1,53 %. Berikut adalah tabel 4.25 yang berisi spesifikasi lengkap dari desain akhir MEMS yang dirancang pada skripsi ini:

Tabel 4.25 Tabel spesifikasi akhir MEMS.

<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
<i>Proofmass</i>		
<i>Neck</i> (p x l x t x $\Sigma$ )	100 x 40 x 40 x 2	um
Badan utama (p x l x t x $\Sigma$ )	500 x 284 x 40 x 2	um
<i>Waist</i> (p x l x t x $\Sigma$ )	164 x 100 x 40 x 1	um
Sirip (p x l x t x $\Sigma$ )	250 x 4 x 40 x 60	um
<i>Spring</i>		
<i>Beam</i> ujung (p x l x t x $\Sigma$ )	146 x 8 x 40 x 8	um
<i>Truss</i> ujung (p x l x t x $\Sigma$ )	8 x 60 x 40 x 4	um
<i>Beam</i> tengah (p x l x t x $\Sigma$ )	450 x 8 x 40 x 2	um
<i>Achor</i> ujung	100 x 42 x 40 x 2	um
<i>Anchor</i> samping	50 x 104 x 40 x 2	um
<i>Fixed structure</i>	14 x 284 x 40 x 4	um
Luas permukaan total	$3,86864 \times 10^{-7}$	m <sup>2</sup>
Massa	$2,886 \times 10^{-8}$	kg
Frekuensi resonansi mekanis ( $f_R$ )	30459.2	Hz
Konstanta pegas	54900	N/m
Kapasitansi (saat V = 5 volt)	$2.283 \times 10^{-6}$	Farad



Gambar 4.13 Desain Akhir MEMS.

Berikut adalah keterangan dari bagian-bagian pada gambar 4.13:

1. Neck.
2. Badan utama.
3. Waist.
4. Sirip.
5. Beam ujung.
6. Truss ujung.
7. Beam tengah.
8. Achor ujung.
9. Anchor samping.
10. Fixed structure.

#### 4.3.1 Perhitungan Konstanta Pegas

Pada sub-bab ini akan diberikan contoh perhitungan konstanta pegas dari MEMS yang dirancang pada skripsi ini. Untuk dapat menghitung nilai konstanta pegas maka perlu dilakukan dua kali perhitungan karena terdapat dua jenis pegas pada rancang bangun MEMS ini, yaitu *stright truss folded beam* pada *spring* ujung dan *simple bridged beam* pada *spring* tengah. Konstanta pegas pada *spring*

ujung dapat dihitung melalui persamaan (2.52) dengan  $I$  merupakan momen inersia pada sumbu  $z$  yang dapat dicari melalui persamaan (4.7) berikut:

$$I = \frac{1}{12} wt^3 \quad (4.7)$$

dengan  $w$  merupakan lebar *beam spring* ujung sebesar  $8 \times 10^{-6}$  m dan  $t$  merupakan ketebalan *beam spring* ujung sebesar  $40 \times 10^{-6}$ . Dengan nilai  $E$  sebesar  $1,07 \times 10^{11}$  Pa dan  $\alpha = L_b / L_t = 2,43$ ; maka nilai  $k_x$  *spring* ujung dapat dihitung besarnya. Berikut perhitungannya:

$$k_{x,ujung} = \frac{(1,07 \times 10^{11})(8 \times 10^{-6})(40 \times 10^{-6})^3 (2 \times 146 \times 10^{-6} + 2,43 \times 60 \times 10^{-6})}{(146 \times 10^{-6})^3 (146 \times 10^{-6} + 2 \times 2,43 \times 60 \times 10^{-6})} = 17600 \text{ N/m}$$

Sementara itu, untuk menghitung konstanta pegas pada *spring* tengah dapat menggunakan persamaan (2.45). Pada persamaan (2.45), variabel  $l$  merupakan panjang *beam spring* tengah,  $w$  merupakan lebar *beam spring* tengah, dan  $t$  merupakan ketebalan *beam spring* tengah. Dengan menetapkan nilai  $\beta = 2$ , maka perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$k_{x,tengah} = 2 \frac{(1,07 \times 10^{11})(8 \times 10^{-6})(40 \times 10^{-6})^3}{(450 \times 10^{-6})^3} = 1200 \text{ N/m}$$

Total nilai konstanta pegas pada rancang bangun MEMS dapat dihitung dengan menjumlahkan nilai  $k_{x,ujung}$  dengan  $k_{x,tengah}$ . Ini dapat dilakukan karena kedua pegas ini terkoneksi secara paralel satu sama lain pada rancang bangun MEMS. Besarnya nilai konstanta pegas total MEMS yaitu:

$$k_{x,total} = 17600 + 1200 = 18800 \text{ N/m}$$

### 4.3.2 Perhitungan Koefisien Damping

Pada sub-bab ini akan diberikan contoh perhitungan koefisien *damping* dari MEMS yang dirancang pada skripsi ini. Pada struktur MEMS yang dirancang pada skripsi ini, mekanisme *damping* terjadi pada bagian elektroda sirip. Pada

skripsi ini digunakan elektroda sirip yang padat tanpa pori sehingga untuk menghitung koefisien *damping* dapat menggunakan persamaan (2.64). Variabel  $W$ ,  $L$ , dan  $d$  dapat dilihat sirip pada tabel 4.25, sementara itu variabel  $\mu$  merupakan viskositas dari udara yang bernilai  $1,81 \times 10^{-5}$  kg/m.s. Berikut adalah perhitungannya:

$$b_{comb} = 2(60)(1.81 \times 10^{-5}) \left( \frac{(4 \times 10^{-6})^3 (250 \times 10^{-6})}{(4 \times 10^{-6})^3} \right) = 5,43 \times 10^{-7} \text{ N.s/m}$$

#### 4.4 Pengaruh Nilai Tegangan Terhadap Pergeseran Sirip

Untuk dapat bekerja, sensor MEMS kapasitif yang dirancang pada skripsi ini akan dicatu dengan beda tegangan tertentu sehingga kedua jenis elektroda sirip, dinamis dan statis, memiliki beda tegangan dan menghasilkan kapasitansi tertentu. Dengan dicatunya kedua jenis elektroda ini maka selain menghasilkan kapasitansi, akan dihasilkan juga gaya elektrostatis,  $F_e$ , di antara keduanya. Seperti telah disebutkan pada sub-bab 2.2.2. Jika beda tegangan yang dicatu ke MEMS terlalu besar dan sampai ke level *pull-in*, maka plat elektroda MEMS akan menempel dan akan membuat MEMS tidak dapat bekerja.

Besarnya tegangan di mana plat elektroda akan menempel disebut dengan tegangan *pull-in* ( $V_P$ ). besarnya  $V_P$  dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.22) dengan  $d$  merupakan jarak terkecil di antara dua plat elektroda yaitu sebesar  $4 \times 10^{-6}$  m,  $\epsilon$  merupakan permitivitas dielektrik di antara kedua plat elektroda yang sebesar  $8,85 \times 10^{-12}$  F/m, dan  $A_{el}$  merupakan luas permukaan plat elektroda yang saling melingkupi yang sebesar  $1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>. Berikut adalah perhitungannya:

$$V_P = \sqrt{\frac{(8)(18800)(4 \times 10^{-6})^3}{(27)(8,85 \times 10^{-12})(1 \times 10^{-9})}} = 6346,881 \text{ volt}$$

Dengan mengetahui besarnya  $V_p$  dalam perancangan maka akan dapat diketahui besarnya jangkauan aman pencatutan tegangan pada MEMS sehingga MEMS terhindar dari kerusakan akibat pencatutan tegangan yang berlebih.

Setelah mengetahui nilai  $V_p$  maka langkah berikutnya adalah melihat besarnya pengaruh pencatutan beda tegangan pada pergeseran plat elektroda MEMS. Berikut adalah tabel 4.26 yang memuat data lengkap analisis ini:

Tabel 4.26 Tabel Pengaruh tegangan terhadap pergeseran plat elektroda.

<b>Tegangan (volt)</b>	<b>Pergeseran (um)</b>	<b>Gaya Elektrostatik (N)</b>
2	0.00102	$1,0 \times 10^{-6}$
4	0.00408	$4,26 \times 10^{-6}$
6	0.00918	$9,59 \times 10^{-6}$
8	0.01632	$1,705 \times 10^{-6}$
10	0.0255	$2,664 \times 10^{-5}$
12	0.0367	$3,83 \times 10^{-5}$
14	0.05	$5,224 \times 10^{-5}$
16	0.06531	$6,823 \times 10^{-5}$
18	0.0826	$8,629 \times 10^{-5}$
20	0.102	$1,065 \times 10^{-4}$
22	0.1234	$1,288 \times 10^{-4}$
24	0.1469	$1,534 \times 10^{-4}$
26	0.1724	$1,8 \times 10^{-4}$
28	0.2	$2,08 \times 10^{-4}$
30	0.2296	$2,39 \times 10^{-4}$
32	0.2612	$2,72 \times 10^{-4}$
34	0.2949	$3,07 \times 10^{-4}$
36	0.3306	$3,84 \times 10^{-4}$
38	0.3684	$3,841 \times 10^{-4}$

40	0.4082	$4,255 \times 10^{-4}$
42	0.45	$4,689 \times 10^{-4}$
44	0.4939	$5,145 \times 10^{-4}$
46	0.5399	$5,623 \times 10^{-4}$
48	0.5878	$6,12 \times 10^{-4}$
50	0.6378	$6,63 \times 10^{-4}$
52	0.6899	$7,175 \times 10^{-4}$
54	0.744	$7,734 \times 10^{-4}$
56	0.8	$8,31 \times 10^{-4}$
58	0.8583	$8,91 \times 10^{-4}$
60	0.918	$9,526 \times 10^{-4}$

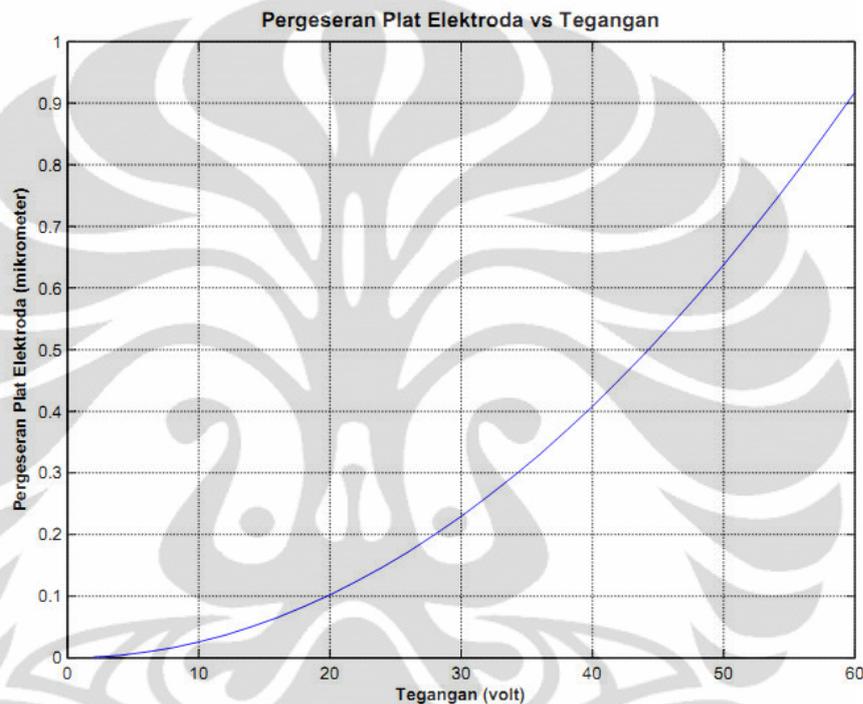
Pada tabel tersebut dapat dilihat secara lengkap efek tegangan 2 volt sampai 60 volt terhadap pergeseran plat elektroda. Terlihat bahwa pergeseran plat elektroda tidak terlalu signifikan walaupun saat MEMS dicatu dengan tegangan 60 volt. Ini disebabkan karena dimensi plat elektroda yang cukup besar dan jarak antara plat statis dan dinamis yang cukup jauh, yaitu 4  $\mu\text{m}$  untuk jarak terdekat dan 18  $\mu\text{m}$  untuk jarak terjauh. Hal ini menyebabkan gaya elektrostatis,  $F_e$ , mendapat perlawanan dari gaya *restoring*,  $F_s$ , sirip yang cukup besar.

Jika diperhatikan, maka setiap plat elektroda dapat berperan sebagai *spring* individual dan akan menghasilkan gaya *restoring*,  $F_s$ , yang melawan gaya luar yang bekerja padanya, dalam hal ini gaya luar tersebut adalah gaya elektrostatis  $F_e$ . Dengan dimensi yang sebesar itu maka kekakuan setiap plat elektroda akan cukup besar sehingga menghasilkan nilai konstanta pegas yang cukup tinggi yang akhirnya menyebabkan nilai  $F_s$  juga meningkat.

Tingkat defleksi yang relatif kecil terhadap tegangan ini membawa satu keuntungan yaitu saat MEMS mengalami gaya luar yang cukup besar. Jika plat elektroda mengalami defleksi yang cukup besar saat dicatu dengan tegangan tertentu maka MEMS tersebut hanya dapat menahan gaya luar yang lebih kecil dibandingkan dengan MEMS yang mengalami defleksi kecil saat dicatu dengan tegangan tertentu, dengan syarat bahwa kedua MEMS memiliki spesifikasi yang

sama. Ini disebabkan karena gaya luar juga akan menambah defleksi plat elektroda.

Dari tabel 4.26 dapat dibentuk sebuah grafik yang akan menunjukkan hubungan yang lebih jelas antara tegangan dan pergeseran plat elektroda. Hubungan tersebut dapat dilihat di gambar 4.14. Pada gambar tersebut terlihat hubungan kuadratik antara keduanya, ini sesuai dengan persamaan (2.19).

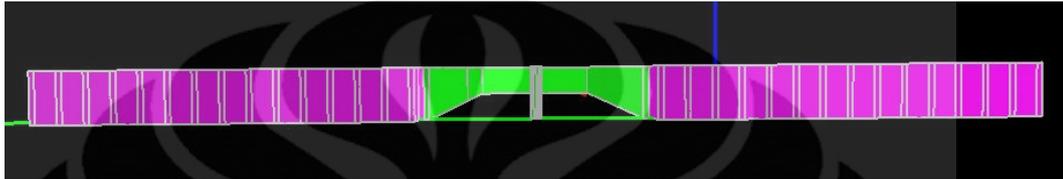


Gambar 4.14 Hubungan pergeseran plat elektroda MEMS dengan beda tegangan.

#### 4.5 Analisis Sagging

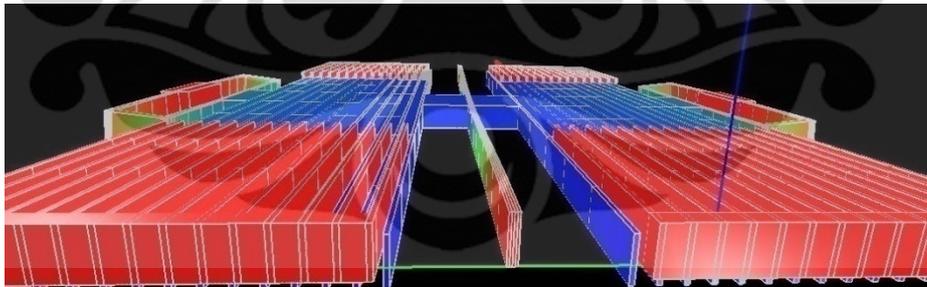
Dalam analisis ini akan dilihat pengaruh gaya berat ke bawah dari struktur MEMS terhadap bentuk struktur MEMS tersebut dalam arah koordinat sumbu  $z$ . Setiap benda memiliki massa dan akan mengalami gaya berat ke bawah searah gaya gravitasi Bumi, yaitu ke arah pusat Bumi, sebesar massa benda tersebut dikali dengan besarnya percepatan gravitasi Bumi di tempat di mana benda tersebut berada. Hal ini berlaku juga untuk MEMS. Walaupun memiliki massa yang sangat kecil, namun pengaruh gaya berat pada MEMS juga harus diperhitungkan untuk dalam perancangan MEMS.

Seperti telah disebutkan pada sub-bab 3.3.5 bahwa di bawah *proofmass* MEMS yang dirancang pada skripsi ini terdapat celah yang sengaja dibuat untuk memungkinkan struktur MEMS berosilasi. Karena adanya celah ini maka dimungkinkan juga struktur MEMS tersebut akan mengalami deformasi ke arah bawah akibat gaya gravitasi. Berikut adalah penampang samping MEMS yang belum mengalami gaya gravitasi ke arah bawah:



Gambar 4.15 Penampang samping MEMS yang belum mengalami deformasi ke arah bawah.

Berikut adalah gambar penampang samping MEMS yang sudah mengalami deformasi ke arah bawah akibat gaya gravitasi:



Gambar 4.16 Penampang samping MEMS yang sudah mengalami deformasi ke arah bawah.

Untuk mensimulasikan pengaruh gaya berat ke bawah pada perancangan MEMS di skripsi ini maka perlu dilakukannya beberapa penyesuaian. Perlu diingat bahwa rancang bangun *proofmass* sebenarnya adalah berlubang namun pada simulasi didesain *proofmass* yang tidak berlubang karena alasan yang telah

disebutkan pada sub-bab 3.3.1. Gaya berat yang bekerja pada struktur MEMS pada skripsi ini adalah massa MEMS tersebut dikalikan dengan besarnya percepatan gravitasi Bumi, dalam hal ini diambil sebesar  $10 \text{ m/s}^2$  untuk memudahkan perhitungan.

Pada Intellisuite<sup>®</sup>, untuk mensimulasikan hal ini dapat dipilih menu Simulation seperti pada gambar 3.3. Setelah itu memilih Stress/Displacement pada bagian Analysis Type. Untuk simulasi ini di Intellisuite<sup>®</sup>, hanya ada satu jenis *load*, yaitu *pressure*. Pemberian tekanan dilakukan pada permukaan atas MEMS yang tegak lurus dengan sumbu z. Sesuai dengan persamaan berikut:

$$P = \frac{F}{A} \quad (4.8)$$

di mana P merupakan tekanan (Pa), F adalah gaya (N), dan A adalah luas permukaan yang dikenai gaya ( $\text{m}^2$ ), maka dapat dihitung tekanan yang diberikan pada permukaan MEMS.

Gaya F dapat dicari dari massa struktur MEMS dikali percepatan gravitasi Bumi. Massa MEMS dapat dicari dengan persamaan:

$$m = \rho V \quad (4.9)$$

dengan menggunakan rho ( $\rho$ ) hasil perhitungan pada sub-bab 3.3.1 yaitu sebesar  $1865,938 \text{ kgm}^{-3}$ , sementara volume MEMS dapat dicari dengan mengalikan luas total permukaan MEMS pada tabel 4.25 dengan ketebalan MEMS sehingga didapat:

$$V = (3,86864 \times 10^{-7})(40 \times 10^{-6}) = 1,547 \times 10^{-11} \text{ m}^3$$

sehingga massa MEMS sebesar :

$$m = (1,547 \times 10^{-11})(1865,938) = 2,886 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

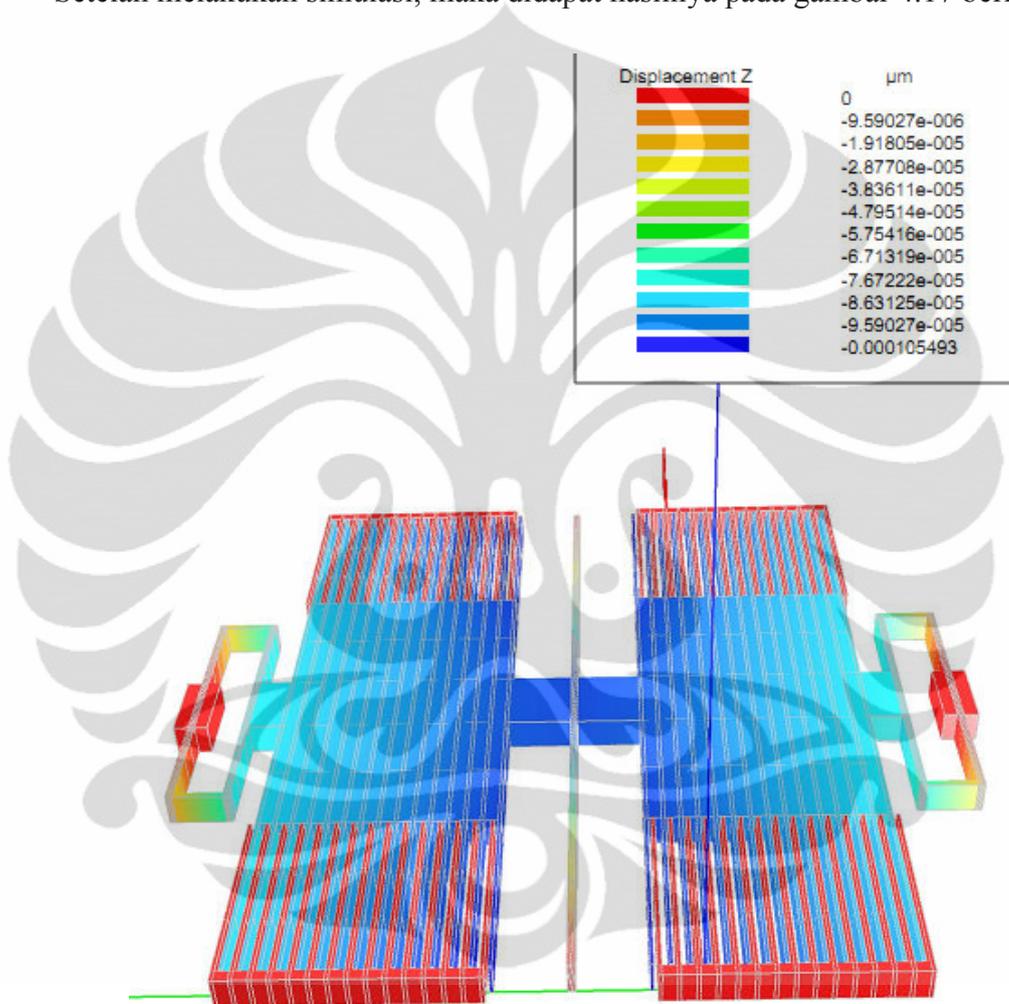
besarnya gaya ke bawah yang dialami oleh MEMS yaitu:

$$F = (2,886 \times 10^{-8})(10) = 2,886 \times 10^{-7} \text{ N}$$

sehingga tekanan yang diberikan pada permukaan MEMS pada analisis dengan Intellisuite<sup>®</sup> adalah sebesar:

$$P = \frac{2,886 \times 10^{-7}}{3,86864 \times 10^{-7}} = 0,756 \text{ Pa}$$

Setelah melakukan simulasi, maka didapat hasilnya pada gambar 4.17 berikut:

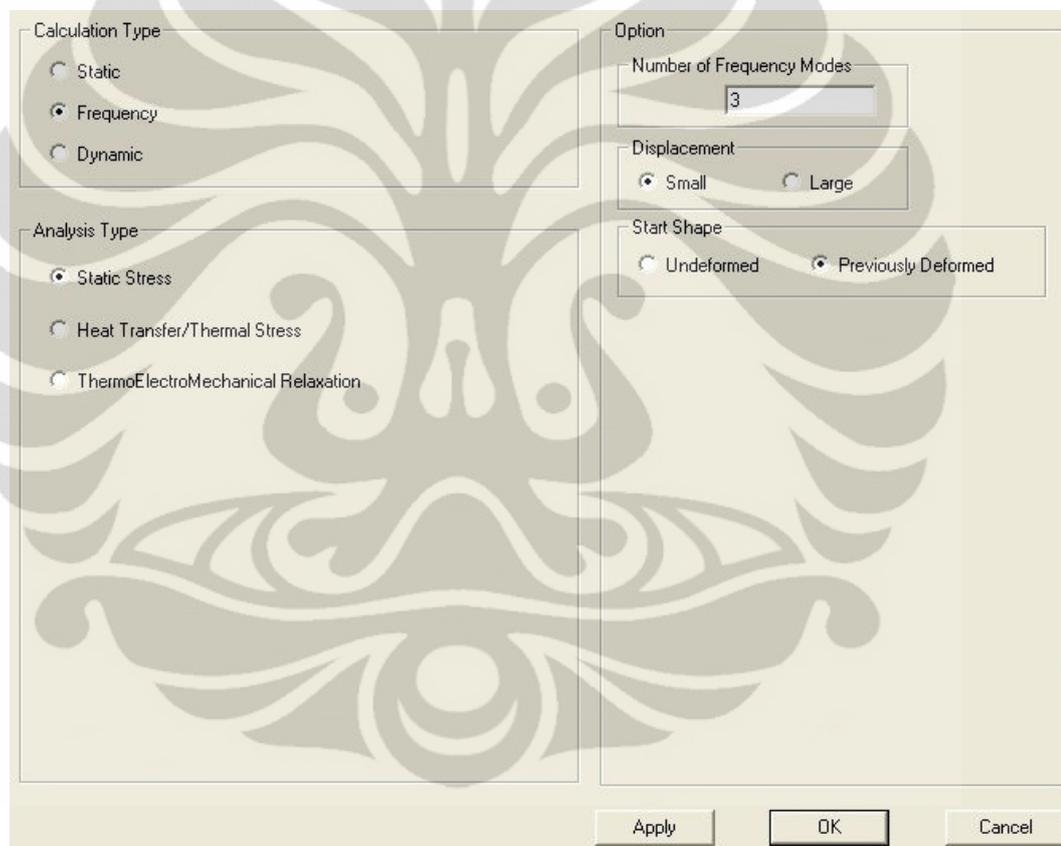


Gambar 4.17 Hasil simulasi *sagging*.

Pada gambar di atas terlihat bahwa pergeseran struktur MEMS terbesar pada sumbu  $z$  hanya sebesar  $1,0549 \times 10^{-4}$  um atau hanya sekita 0,10549 nm. Ini merupakan angka yang sangat kecil. dibandingkan dengan dimensi MEMS secara keseluruhan.

Fenomena *sagging* juga berpengaruh terhadap kinerja MEMS secara keseluruhan. Nilai frekuensi resonansi mekanis yang ada pada tabel 4.25 didapat dengan tidak memperhitungkan fenomena ini. Pada sub-bab ini akan dianalisis mengenai perubahan nilai frekuensi resonansi mekanis MEMS saat diikutsertakannya fenomena ini pada analisis.

Langkah awal dari hal ini yaitu dengan melakukan analisis *sagging* pada struktur MEMS dan setelah itu memilih menu simulasi seperti pada gambar 4.18 berikut:



Gambar 4.18 Pemilihan menu untuk mengikutsertakan fenomena *sagging* pada analisis frekuensi natural.

Dapat dilihat pada gambar di atas pada bagian Start Shape bahwa dipilih pilihan *Previously Deformed*. Pilihan ini memungkinkan analisis frekuensi natural dengan struktur MEMS berada dalam kondisi terdeformasi ke bawah akibat analisis *sagging* sebelumnya. Dari hasil analisis nilai frekuensi resonansi, di mana

diikutsertakan fenomena *sagging* di dalamnya, didapat nilai  $f_R$  yang sama antara sebelum dan sesudah diikutsertakannya fenomena *sagging* yaitu sebesar 30459.2 Hz. Tidak adanya perubahan nilai  $f_R$  dikarenakan defleksi maksimal MEMS akibat fenomen *sagging* terlalu kecil , seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.16, untuk dapat mengubah nilai  $f_R$  .



## BAB 5

### KESIMPULAN

Dari skripsi mengenai perancangan sensor MEMS kapasitif spektral molekuler ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada skripsi ini berhasil dirancang sensor MEMS kapasitif dengan frekuensi resonansi mekanis sebesar 30459.2 Hz.
2. Persentase kesalahan antara frekuensi resonansi mekanis yang ditargetkan dengan yang telah dicapai mencapai 1,53 %.
3. Nilai *pull-in voltage* dari MEMS yang dirancang bernilai sebesar 6346,881 volt.
4. Fenomena *sagging* tidak mempengaruhi kinerja MEMS hasil perancangan karena nilai frekuensi resonansi mekanis sebelum dan setelah terjadi fenomena *sagging* bernilai sama.

## DAFTAR REFERENSI

- [1] Yanuar, Yudi. *Perancangan MEMS Mixer-Filter untuk Sistem Receiver Mobile Wimax pada Frekuensi 2,3 GHz*. Tesis. Universitas Indonesia, 2010.
- [2] Tamsir, Agus Santoso. *Differential Capacitive MEMS Accelerometer with non Crossing Sensing Element for Air Bag Application*. Final Report. Universiti Kebangsaan Malaysia, 2005.
- [3] Chairunissa, Cindy. *Perancangan Filter MEMS-TFBAR untuk Aplikasi Mobile Wimax 2,3 GHz*. Skripsi. Universitas Indonesia, 2010.
- [4] Selvakumar, Arjun. *A Multifunctional Micromachining Technology for High Performance Microsensors and Microactuator*. Dissertation. University Michigan, 1997.
- [5] Mardiansyah, Taufiq. *Uji Keakuratan Program SUGAR dalam Simulasi Pengaruh Dimensi Akselerometer MEMS Kapasitif Terhadap Pergeseran Proofmass Akibat Pemberian Gaya*. Skripsi. Universitas Indonesia, 2010.
- [6] Fedder, Garry Keith. *Simulation of Microelectromechanical Systems*. Dissertation. University of California, 1994.
- [7] Kaajari, Ville. *MEMS Tutorials: Pull-in voltage in electrostatic microactuators*. [http://www.kaajakari.net/~ville/research/tutorials/pull\\_in\\_tutorial.pdf](http://www.kaajakari.net/~ville/research/tutorials/pull_in_tutorial.pdf)
- [8] *Lecture #7: Lagrange's Equations*. Massachusetts Institute of Technology © How, Deyst 2003.