



Universitas Indonesia

**PENGARUH VARIASI SPRING DAN MASSA
PADA MEMS ELEKTRODA SENSOR
DIELEKTROMETRIK SPEKTRAL SENSING
MOLEKULER UNTUK FREKUENSI MEKANIK
DIBAWAH 90 KHZ**

SKRIPSI

**NYSSA ADI
0706267906**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITASI INDONESIA
JUNI 2011**



Universitas Indonesia

**PENGARUH VARIASI SPRING DAN MASSA
PADA MEMS ELEKTRODA SENSOR
DIELEKTROMETRIK SPEKTRAL SENSING
MOLEKULER UNTUK FREKUENSI MEKANIK
DIBAWAH 90 KHZ**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

**NYSSA ADI
0706267906**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITASI INDONESIA
JUNI 2011**

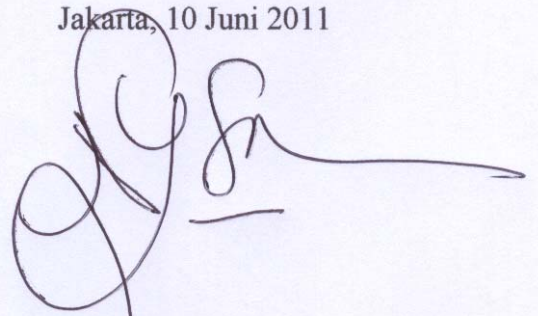
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

PENGARUH VARIASI SPRING DAN MASSA PADA MEMS ELEKTRODA SENSOR DIELEKTROMETRIK SPEKTRAL SENSING MOLEKULER UNTUK FREKUENSI MEKANIK DIBAWAH 90 KHZ

yang dibuat untuk melengkapi salah satu persyaratan untuk menjadi sarjana teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan/atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian-bagian yang telah dicantumkan sumber-sumber informasinya sesuai dengan ketentuan yang telah ditentukan.

Jakarta, 10 Juni 2011



Nyssa Adi

0706267906


LEMBAR PENGESAHAN


Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Nyssa Adi
NPM : 0706267906
Prigram Studi : Elektro
Judul Skripsi : Pengaruh Variasi Spring dan Massa pada MEMS
Elektroda Sensor Dielektrometrik Spektral
Molekuler untuk Frekuensi Mekanik Di Bawa 90
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

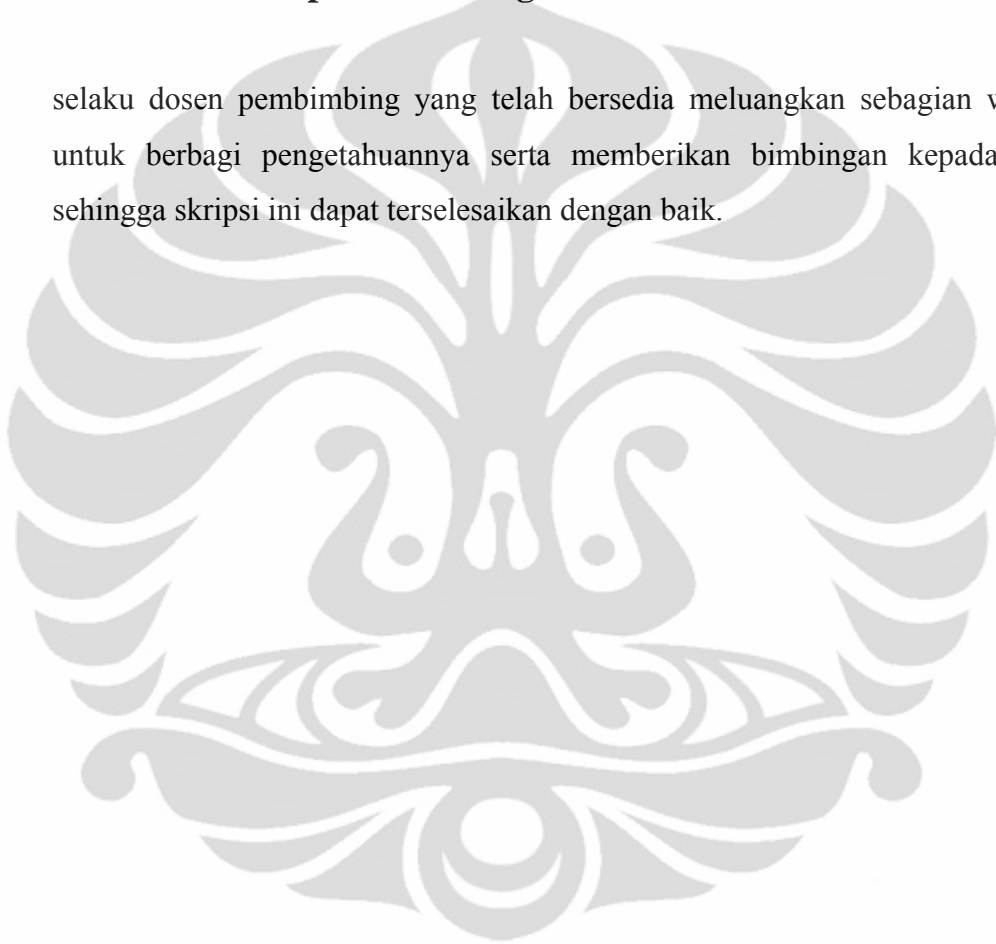
Tanggal : 30 Juni 2011

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

Bapak DR.Ir. Agus Santoso Tamsir MT

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan sebagian waktunya untuk berbagi pengetahuannya serta memberikan bimbingan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.



KATA PENGANTAR

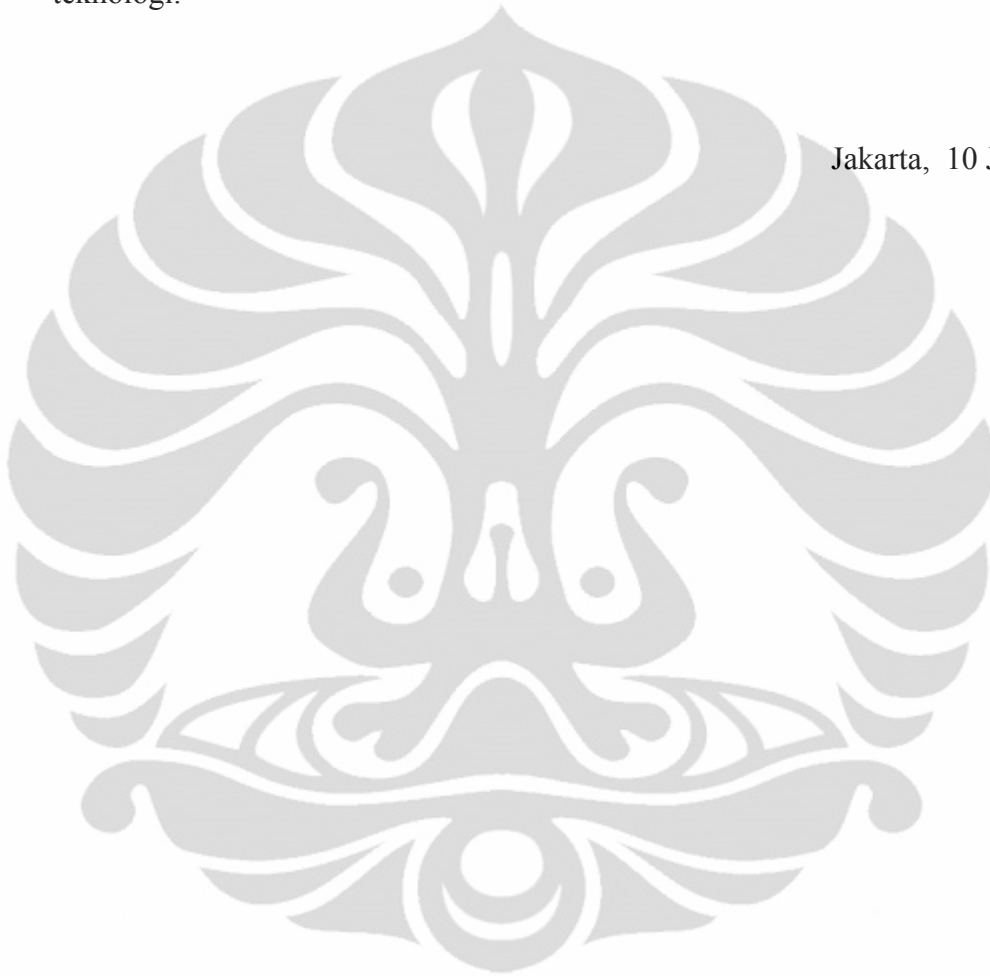
Puji dan syukur atas rahmat dan berkat yang telah diberikan oleh Tuhan Yang Maha Kuasa kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tepat waktu. Penulisan karya ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro, Kekhususan Teknik Elektronika, pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik berkat bimbingan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr.Ir. Agus Santoso Tamsir, M.T, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi, bimbingan, motivasi serta persetujuan sehingga tesis ini dapat selesai dengan baik.
2. Prof.Dr. Burhanuddin Yeop Majlis dari *Institute of Microengineering and Nanoelectronics*-Universitas Kebangsaan Malaysia, atas bantuannya dalam MEMS simulator *Intellisuite* untuk menyelesaikan skripsi ini.
3. Seluruh anggota keluarga, terutama orangtua yang selalu mendukung dan memberi semangat untuk penulis
4. Ooq, yang selalu setia menemani, menyemangati, memberi nasihat, memarahi kalau penulis hilang arah. Tempat membuang segala rasa sebel, kesal, marah-marah ketika apa yang dicoba tidak memenuhi harapan.
5. Pongpong, yang selalu setia menemani dan menjaga setiap waktu, walaupun setiap hari penulis sibuk dengan pengerjaan skripsi dan pekerjaan yang ada.
6. Tim RF MEMS, Yediael, yang telah bersama-sama penulis melalui suka duka sejak awal penyusunan, simulasi yang gagal terus, hingga akhirnya bisa berhasil dan memperoleh hasil yang diharapkan
7. Sahabat seperjuangan Teknik Elektro UI 2007, khususnya teman - teman satu bimbingan penulis yang telah saling membantu dalam pembuatan skripsi;
8. Para peneliti sebelum ini yang memberikan sumber bacaan
9. Seluruh Civitas akademik Departemen Teknik Elektro FTUI dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu

Tiada gading yang tak retak, demikian pula manusia juga tidak ada yang sempurna. Penulis membuka diri untuk menerima kritik,saran dan pendapat semua pihak, agar dapat semakin memperbaiki diri. Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan semua pihak yang membantu. Penulis berharap karya ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Jakarta, 10 Juni 2011



Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Nyssa Adi
NPM : 0706267906
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:

PENGARUH VARIASI SPRING DAN MASSA PADA MEMS ELEKTRODA SENSOR DIELEKTROMETRIK SPEKTRAL SENSING MOLEKULER UNTUK FREKUENSI MEKANIK DIBAWAH 90 KHZ


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 Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 10 Juni 2010

Yang menyatakan



Nyssa Adi

ABSTRAK

Nama : Nyssa Adi
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Pengaruh Variasi Spring dan Massa Pada MEMS Elektroda Sensor Dielektrometrik Spektral Sensing Molekular Untuk Frekuensi Mekanik Dibawah 90 kHz

Sensor spektral molekular merupakan sensor menggunakan kaidah elektroda bergerak (MEMS) sebagai elektroda pengukur kapasitansi dari bahan-bahan diatasnya (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 *damping coefficient*). Selanjutnya juga dihitung frekuensi resonansi mekanis dari elektroda tersebut

Kata kunci : MEMS, Elektroda getar, Sensor Spektral Molekular

ABSTRACT

Name : Nyssa Adi
Major : Electrical Engineering
Title : Effects of Variation of Spring and Mass on MEMS Sensor Electrodes for Sensing Molecular Spectral Dielectrometric with Mechanical Frequency less than 90 kHz

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 skripsi, 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

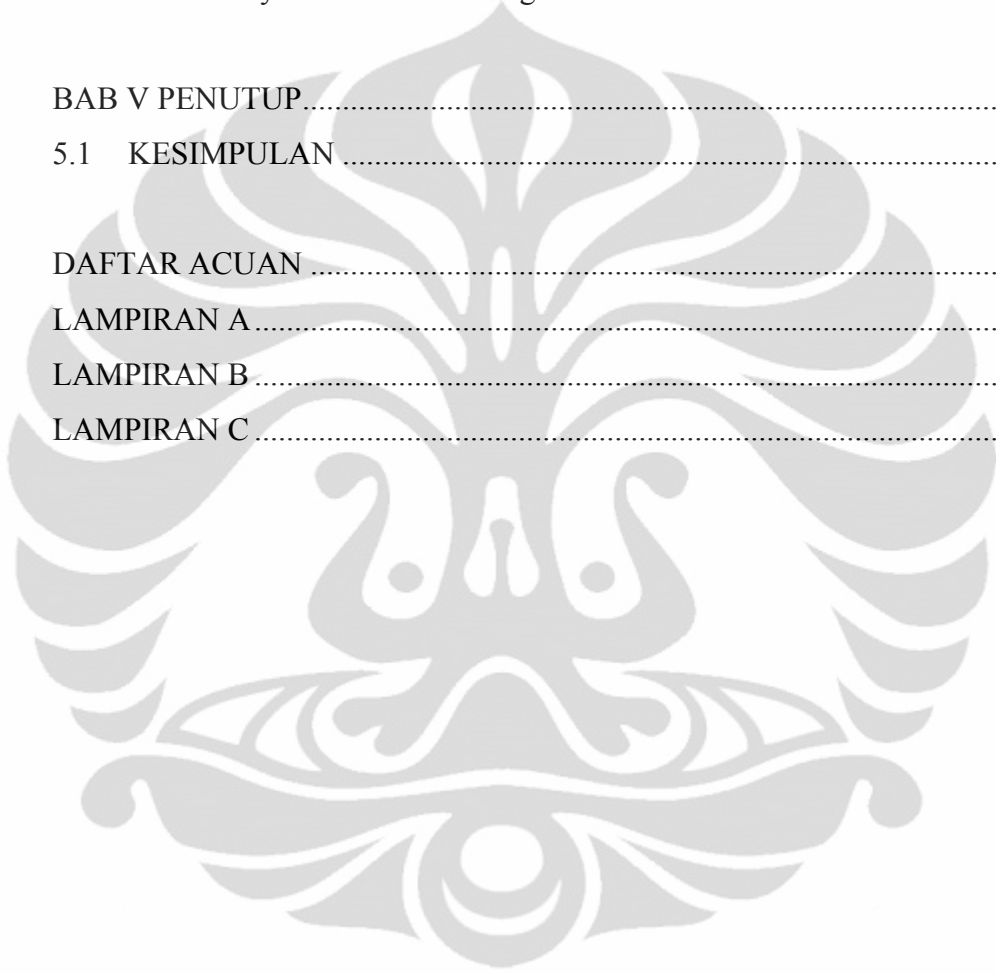
DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
UCAPAN TERIMAKASIH.....	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vii
ABSTRACT.....	viii
ABSTRAK	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GRAFIK DAN LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	3
1.4 Metodologi Penulisan	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB III MEMS ELEKTRODA.....	6
2.1 INTRODUKSI.....	6
2.2 PROSPEK MEMS ELEKTRODA	8
2.3 BENTUK <i>PROOFMASS</i>	12
2.4 ARAH PERGERAKAN	14
2.5 SISTEM <i>MASSA SPRING DAMPING</i>	14
2.5.1 <i>Massa proofmass</i>	15
2.5.2 <i>Spring constant</i> (Konstanta pegas)	17
2.5.3 <i>Damping coefficient</i> (Koefisien <i>damping</i>).....	23

2.5.3.1	Variasi damping permukaan perforasi	25
2.5.3.2	Variasi damping pada jarak comb fingers.....	26
3.3	INTERFACE KAPASITANSI	26
3.4	MEKANISME SENSING	27
BAB III DESIGN DAN OPTIMASI MEMS ELEKTRODA		29
3.1	<i>INTELLISUITE SIMULATOR OVERVIEW</i>	31
3.2	PEMODELAN MEMS SENSOR SPEKTRAL MOLEKULER.....	33
3.3	SIMULASI PEMODELAN.....	35
3.3.1	<i>Mechanical analysis</i>	36
3.3.2	<i>Electrostatic analysis</i>	38
3.3.3	<i>Electromechanical analysis</i>	39
3.3.4	<i>Shagging analysis</i>	41
3.4	OPTIMASI PEMODELAN.....	42
3.4.1	Optimasi proofmass (seismic mass)	43
3.4.2	Optimasi fingers.....	45
3.4.3	Optimasi tether.....	46
BAB IV SIMULASI DAN ANALISA OPTIMASI		49
4.1	METODOLOGI PENELITIAN	49
4.2	HIPOTESIS	50
4.3	SIMULASI	52
4.4	HASIL SIMULASI DAN ANALISA	54
4.4.1	Pengaruh Variasi Dimensi Terhadap Frekuensi Mekanis.....	54
4.4.2	Pengaruh Variasi Bentuk Bentuk dan Ukuran Spring Tengah Terhadap Frekuensi Natural (Mekanis)	59
4.4.3	Pengaruh Variasi Dimensi terhadap Perubahan Nilai Spring Konstan	64
4.4.4	Pengaruh Beban Proofmass terhadap displacement Z.....	71

4.4.5 Pengaruh Variasi Tegangan terhadap displacement Y	74
4.4.6 Pengaruh Variasi Tegangan dan Displacement Y terhadap Gaya Elektrostatis Yang Dihasilkan	76
BAB V PENUTUP.....	79
5.1 KESIMPULAN	79
DAFTAR ACUAN	81
LAMPIRAN A.....	84
LAMPIRAN B.....	87
LAMPIRAN C.....	90



DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1	Mems divais.....	6
Gambar 2.2	Struktur <i>comb finger kapasitif</i>	8
Gambar 2.3	Pemetaan MEMS divais dan teknologinya.....	10
Gambar 2.4	Pemetaan aplikasi MEMS	11
Gambar 2.5	<i>Fishbone proofmass</i>	12
Gambar 2.6	<i>Platted proofmass</i>	12
Gambar 2.7	<i>Cantilever</i>	13
Gambar 2.8	Akselerometer kapasitif asimetris	13
Gambar 2.9	<i>Capacitive sensing possibility fixed – movable plates (a) gap variation dan (b) area variation</i>	14
Gambar 2.10	Pemodelan <i>sistem massa spring damping</i>	15
Gambar 2.11	Konfigurasi <i>beam</i>	18
Gambar 2.12	Ekspresi <i>spring constant</i> k pada sumbu y berbagai design ..	18
Gambar 2.13	<i>Conventional folded beam design</i> dengan <i>rigid truss</i>	19
Gambar 2.14	Bentuk <i>tether</i> untuk <i>comb finger</i> kapasitif.....	21
Gambar 2.15	<i>Seismic mass</i> dengan 4 STFB <i>tether</i>	21
Gambar 2.16	<i>Free body diagram STFB analysis</i>	22
Gambar 2.17	Mekanisme <i>damping</i>	23
Gambar 2.18	Grafik nilai fungsi rasio antara panjang dan lebar plat.....	24
Gambar 2.19	Pergerakan permukaan plat terperforasi.....	25
Gambar 2.20	<i>Sensing</i> kapasitif.....	28
Gambar 3.1	Tampilan IntelliSuite setelah <i>terinstall</i>	30
Gambar 3.2	Spesifikasi Si_Czochralski_100	32
Gambar 3.3	Design 3Dbuilder yang belum disimulasikan (1).....	33
Gambar 3.4	Design 3Dbuilder yang belum disimulasikan (2).....	34
Gambar 3.5	<i>Import material properties</i>	35
Gambar 3.6	<i>Editing material properties</i>	36
Gambar 3.7	<i>Mechanical analysis simulation setting</i>	37

	Halaman
Gambar 3.8 <i>Electrostatic analysis simulation setting</i>	38
Gambar 3.9 <i>Electromechanical analysis simulation setting</i>	40
Gambar 3.10 <i>Shagging analysis simulatin setting</i>	41
Gambar 4.1 MEMS divais dengan 2 pelat kapasitor paralel sejajar yang mengapit pelat bergerak	74

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Aplikasi MEMS dalam berbagai sektor	10
Tabel 4.1a Percobaan 1a – 1f data mentah	54
Tabel 4.1b Percobaan 1a – 1f data olah	57
Tabel 4.3a Percobaan 2a – 2f data mentah	65
Tabel 4.3b Percobaan 2a – 2f data olah	70
Tabel 4.4 Variasi tegangan dan displacement y terhadap gaya elektrostatik yang dihasilkan	71-72
Tabel 5.5 Shagging analysis	76

DAFTAR GRAFIK

	Halaman
Grafik 4.1a Percobaan 1a – 1f data mentah	55
Grafik 4.1b Pengolahan Data Percobaan 1a – 1f	56
Grafik 4.1c Pengolahan Data Percobaan 1a – 1f	58
Grafik 4.2a Data mentah Stair Spring dengan truss theter 51 μ m	60
Grafik 4.2b Data olah Stair Spring dengan truss theter 51 μ m	60
Grafik 4.2c Data mentah Stair Spring dengan truss theter 102 μ m	61
Grafik 4.2d Data olah Stair Spring dengan truss theter 102 μ m	61
Grafik 4.2e Data mentah Stair Spring dengan truss theter 102 μ m	62
Grafik 4.2f Data olah Stair Spring dengan truss theter 102 μ m	62
Grafik 4.2g Data mentah Stair Spring dengan truss theter 102 μ m	63
Grafik 4.2h Data olah Stair Spring dengan truss theter 102 μ m	63
Grafik 4.3a Percobaan 2a – 2f data mentah	67
Grafik 4.3b Percobaan 2a – 2f data olah	68

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
LAMPIRAN A PENURUNAN RUMUS STFB	84
LAMPIRAN B PEMBACAAN LEGENDA GRAFIK	87
LAMPIRAN C DATA DAN GRAFIK SIMULASI	90

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Jika kita perhatikan kecenderungan dari perkembangan teknologi yang terjadi dewasa ini, kita akan menemukan bahwa semakin tinggi teknologi yang dipergunakan, maka akan semakin meminimalisasi penggunaan alat-alat produksi, dan tentunya alat-alat hasil produksi tersebut. Kecenderungan ini sudah diprediksi sejak zaman dahulu. Salah satunya oleh Richard P. Feynman, fisikawan terkenal yang memberikan pidato tentang pemanipulasian dan pengontrolan dari benda-benda berukuran kecil kecil pada tahun 1993. Kala itu, beliau memberikan contoh mengenai sistem biologis manusia yang berukuran sangat kecil [1]

Untuk memenuhi tuntutan laju perkembangan teknologi telekomunikasi dan komponen, divais pun dirancang semakin lama semakin kecil dalam dimensi, dan hanya membutuhkan konsumsi daya yang sedikit. Salah satu teknologi divais yang saat ini sedang berkembang adalah *Microelectro Mechanical System* (MEMS). Istilah MEMS mengacu pada sekumpulan mikrosensor dan mikroaktuator yang dapat mengindera lingkungannya serta dapat memberikan reaksi terhadap perubahan pada lingkungannya dengan menggunakan pengendali mikrochip [3]. Hingga saat ini, teknologi MEMS telah menghasilkan suatu hal yang menakjubkan terkait dengan fungsinya, antara lain dapat digunakan untuk sensor *otomotif*, *actuator wireless communication*, dan kedokteran.[2]

MEMS difabrikasikan dengan teknologi yang sama seperti transistor, dalam ukuran micrometer, namun menawarkan fungsionalitas tambahan seperti sensor mekanik dan aktuator. Substrat dasar dari MEMS komersial adalah silikon. Mikrokomponen dapat membuat sistem bekerja lebih cepat, handal, fleksibel, murah dan dapat menggabungkan beberapa fungsi kompleks (*"Lab on Chip"*). Untuk mengatasi keterbatasan chip mikrokomponen tersebut, digunakan prinsip variasi kapasitans dimana memanfaatkan kekakuan resonator yang mengakibatkan perpindahan mekaniknya sangat kecil [4]

Keuntungan MEMS dibandingkan teknologi lainnya menurut Lang yang diungkapkan pada tahun 1999 :

1. Secara umum berupa pengurangan massa dan ukuran,
2. Biaya produksi yang lebih rendah,
3. Konsumsi energi yang lebih rendah akibat ukuran yang lebih kecil,
4. Penggunaan material yang lebih sedikit ketika proses manufaktur sehingga, menghindari kelangkaan bahan maupun bahaya lingkungan,
5. Mudah untuk dibuang dan didaur ulang,
6. Tahan lama dan awet karena insertion loss rendah,
7. Memenuhi standard komunikasi untuk menghindari kerumitan kabel dan peripheral nya,
8. MEMS dapat mengisolasi frekuensi relative yang tidak diinginkan (gelombang RF yang relative tinggi) sehingga kemungkinan interferensi dan jamming sangat rendah.

Isu dari pengembangan teknologi MEMS ini telah ditekankan sejak pertemuan bertajuk “*Transducer*” yang terjadi pada tahun 1987 di Tokyo, Jepang. Pertemuan ini membahas cikal bakal teknologi MEMS, dimulai dari struktur permukaan suatu mesin yang berukuran micron. Hingga sekarang, teknologi dan aplikasi MEMS berkembang semakin pesat [4]. Salah satu contoh produk MEMS yang akan dibahas pada skripsi ini adalah MEMS elektroda untuk sensor dielektrometik spektral molekuler. Sensor spektral molekuler merupakan sensor menggunakan kaidah elektroda bergerak (MEMS) sebagai elektroda pengukur kapasitansi dari bahan-bahan di atasnya (menggunakan konsep FEF).

1.2 TUJUAN PENULISAN

Tujuan dari penulisan skripsi ini antara lain :

1. Memenuhi salah satu persyaratan untuk menjadi sarjana Teknik Elektro Departemen Teknik Universitas Indonesia,
2. Mengidentifikasi teknologi MEMS, terutama MEMS elektroda untuk sensor dielektrometik spektral molekuler,
3. Mengidentifikasi modifikasi letak dan ukuran spring yang dipergunakan pada MEMS elektroda untuk sensor dielektrometik spektral molekuler .

1.3 BATASAN MASALAH

Untuk mempermudah dan menyederhanakan permasalahan yang dihadapi dalam perancangan resonator osilator, maka penulis memberikan beberapa batasan, yaitu:

1. Perancangan dan penelitian MEMS elektroda untuk sensor dielektrometrik spektral molekuler dengan frekuensi dibawah 90 kHz. Perancangan MEMS elektroda tidak diintegrasikan dengan komponen elektronika lain
2. Perancangan dilakukan dengan memvariasikan spring dan massa, dengan beberapa batas-batas yang selalu dianggap konstan. Batas-batas itu adalah sebagai berikut
 - a. *Proofmass* tepatnya *Seismic mass* harus memiliki lebar 500 μm
 - b. *Proofmass* dan berbentuk *fishbone*
 - c. *Proofmass* memiliki konstruksi menyerupai papan catur, hanya pada bagian sisinya, tidak memiliki lubang.
 - d. Panjang *fingers* harus berukuran 250 μm x 4 μm x 40 μm
 - e. Cantilever yang dipergunakan memiliki panjang konstan 250 μm
 - f. Ukuran divais keseluruhan 1000 μm x 1000 μm x 40 μm
 - g. Ukuran lubang, minimal 4 μm x 4 μm x 40 μm
 - h. Letak *anchor fixed*
 - i. Spring mengikuti kaidah *Straight Truss Folded Beam* (STFB), hanya diperbolehkan menggunakan 2 STFB, sedangkan *cantilever* tidak dibatasi
3. Dalam penelitian ini perancangan hanya sampai pada tahap simulasi dan perancangan hanya difokuskan pada rancangan bagian MEMS elektroda
4. Bagian lain yang tidak berkaitan dengan MEMS elektroda ini tidak akan dibahas pada skripsi ini.

1.4. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang dipergunakan untuk untuk penelitian dalam skripsi dan skripsi ini terdiri dari beberapa tahapan, antara lain :

1. Studi literature (studi pustaka), yaitu dengan membaca jurnal ilmiah, buku dan artikel untuk memperoleh pengetahuan dasar topik
2. Mengkonsultasikan pengetahuan dasar yang telah dimiliki dengan dosen pembimbing. Ketika sudah siap, dengan mempergunakan referensi paper dan buku penunjang, penulis mencari peluang kemungkinan untuk mengeksplorasi sebuah tema yang berhubungan dengan MEMS, terutama yang menyangkut dielektrometik spectral molekuler
3. Melakukan simulasi terhadap rancangan awal yang telah dibuat oleh peneliti dengan mempergunakan software intellisuite untuk melakukan beberapa jenis simulasi, antara lain : electrostatic analysis, mechanical analysis, electromechanical analysis, natural frequency analysis, pressure load analysis (hanya rancangan awal saja yang diberikan perlakuan seperti ini karena untuk melakukan pengecekan apakah design yang dipergunakan sudah valid dan memenuhi standard. Untuk rancangan turunan / variasi yang dilakukan, hanya akan dikenakan natural frequency analysis saja karena pada skripsi lebih difokuskan pada frekuensi mekanis yang dihasilkan).
4. Hasil validasi yang diperoleh dipergunakan sebagai acuan untuk melakukan modifikasi terhadap rancangan tersebut. Optimasi dilakukan dengan memvariasikan dimensi resonator Silikon. Variasi yang dilakukan meliputi 3 hal, yaitu variasi dimensi, variasi struktur material, dan bentuk.
5. Menganalisis hasil simulasi diperoleh dari optimasi yang telah dilakukan dan menentukan optimasi apa yang memberikan hasil paling optimum, dan faktor apa saja yang mendukung sehingga optimasi tersebut optimum.

1.5 PENULISAN

BAB 1 PENDAHULUAN

Pendahuluan terdiri atas latar belakang, tujuan penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2 FABRIKASI MEMS ELEKTRODA

Pada bab ini akan dibahas mengenai tinjauan literatur. Yang antara lain berisi mengenai jenis pengenalan MEMS, bentuk-bentuk *proofmass*, dan kemungkinan arah pergerakan *proofmass*

BAB 3 STRUKTUR MEMS ELEKTRODA

Bab ini menjelaskan mengenai dasar teori MEMS elektroda, sistem massa *spring damping* yang meliputi penjelasan mengenai massa *proofmass* dan *spring constant* dan *damping coefficient*. Dijelaskan pula mengenai variasi *damping coefficient* pada permukaan perforasi dan pada jarak antar *fingers*

BAB 4 DESIGN DAN OPTIMASI MEMS ELEKTRODA

Bab ini menjelaskan mengenai program simulasi Intellsuite yang dipergunakan untuk merancang dan mensimulasikan, pemodelan MEMS. Jenis-jenis dan bagaimana cara simulasi dengan TEM yang meliputi modul *mechanical analysis*, *electrostatic analysis*, *thermoelectromechanical analysis* dan *shagging analysis*. Selanjutnya akan dibahas mengenai kemungkinan optimasi design yang dibagi-bagi berdasarkan tempatnya.

BAB 5 SIMULASI DAN ANALISA OPTIMASI SPRING

Bab ini memaparkan hasil simulasi yang telah dilakukan selama kurang lebih empat bulan. Data mentah yang diperoleh disajikan dalam bentuk tabel. Data tersebut kemudian akan dikelompokkan dan diolah sedemikian rupa sehingga diperoleh suatu kesimpulan. Dari kesimpulan yang ada, dibentuklah grafik yang sesuai dengan analisa yang akan dilakukan. Dari data dan grafik yang ada, akan dilakukan analisa secara mendalam mengenai efek variasi ukuran, bentuk dan letak dari spring terhadap frekuensi mekanis yang dihasilkan oleh MEMS elektroda.

BAB 6 PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari percobaan dan simulasi yang telah dilakukan oleh penulis.

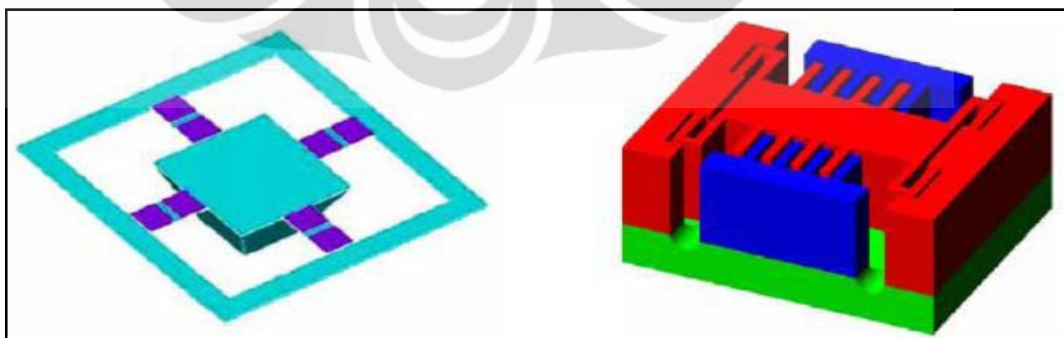
BAB II

MEMS ELEKTRODA

2.1 INTRODUKSI

MEMS elektroda merupakan dasar utama untuk sensor spektral molekuler . Sensor ini menggunakan kaidah elektroda bergerak (MEMS) sebagai elektroda pengukur kapasitansi dari bahan-bahan di atasnya (menggunakan konsep FEF). FEF adalah *Fringing Electric Field*. Oleh karena itu, elektroda bergerak merupakan MEMS *sensing element*.

Secara umum, struktur MEMS elektroda sensor spektral molekuler yang dirancang oleh penulis terdiri dari proofmass, yang dapat berbentuk massa seismik atau *comb finger* yang dihubungkan dengan pegas yang bertumpu pada suatu *anchor*. *Anchor* berfungsi sebagai bagian yang tetap (tempat berpijak, *fixed*). MEMS elektroda yang disimulasikan oleh penulis, diasumsikan tidak menggunakan efek *piezoresistif* dari material silicon, dimana ketika mengalami percepatan, akan mengakibatkan tekanan pada bahan dan pada akhirnya akan menyebabkan perubahan nilai resistansi bahan *piezoresistor*. Percepatan ini dapat dihitung dengan mengukur perubahan resistansi yang terjadi pada bahan *piezoresistor*. Efek *piezoresistif* tidak ikut dipergunakan karena efek *piezoresistif* memiliki kelemahan mendasar yaitu ketidaktahanan terhadap *noise* dan pada besarnya daya yang dipergunakan.



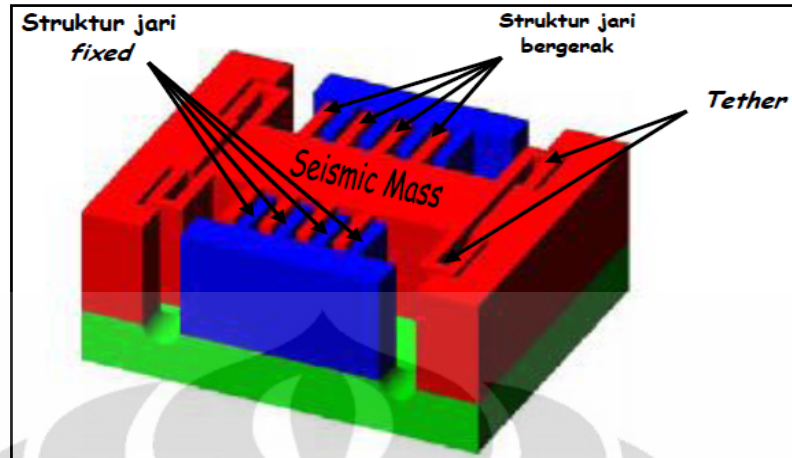
Gambar 2.1 MEMS divais (a) *Seismic mass Device* (b) *Comb Drive Device* [3]

MEMS elektroda sensor spektral molekuler yang dibahas dalam skripsi ini memanfaatkan perubahan dari kapasitansi akibat dari perubahan posisi *proofmass* terhadap *frame* akibat adanya percepatan. MEMS elektroda yang dibuat dengan memanfaatkan perubahan dari kapasitansi bisa disebut memiliki efek kapasitif. Efek kapasitif banyak digunakan tidak hanya pada MEMS elektroda, tetapi juga pada aplikasi MEMS lainnya seperti *accelerometer*, *gyroscope*, dll karena efek kapasitansi lebih tahan terhadap suhu, hanya mengonsumsi daya yang rendah dan tidak tergantung dari bahan dasar material yang dipergunakan (tetapi bergantung kepada bentuk geometris seperti panjang dan lebar penampang yang dalam hal ini berarti bentuk *proofmass*) [16]. MEMS elektroda ini akan menggunakan dua plat yang dipasang paralel. Lebih jauh lagi akan dibahas bagaimana efek kapasitansi akibat penggunaan plat yang dipasang

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

A merupakan luas penampang dari elektroda, d merupakan jarak antar plat dan ϵ merupakan permitivitas dari material yang berada di antara plat tersebut. Perubahan pada salah satu parameter ini akan mengakibatkan perubahan kapasitansi dan variasi dari setiap variabel inilah yang diaplikasikan dalam MEMS elektroda (kapasitif) sensor dielektrometrik spektral molekuler.

Dalam membuat MEMS elektroda kapasitif, *comb finger* merupakan design yang paling umum dan paling banyak dipergunakan [17]. Desain *comb finger* ini menggunakan dua buah struktur jari-jari dalam mengukur perubahan kapasitansi, dimana satu struktur bergerak dan struktur lainnya tidak bergerak (*fixed*). Struktur jari yang bergerak akan dihubungkan ke sebuah *seismic mass* dan gabungan dari *seismic mass*. Struktur jari-jari ini biasa disebut dengan *proofmass*. Pada keempat ujung *proofmas* tersebut, akan dihubungkan empat buah *tether* (pegas). Pada ujung lain dari pegas tersebut, akan ditambatkan pada suatu substrat sehingga akhirnya membuat *proofmass* menjadi pelayang diatas substrat. Struktur jari yang tidak bergerak akan dihubungkan dengan substrat.



Gambar 2.2 Struktur *Comb finger* kapasitif [3]

Jika desain *comb finger* ini mendapatkan gaya dari luar, maka *proofmass* dan struktur jari yang menempel pada *proofmass* akan bergerak, sedangkan struktur jari yang *fixed* tetap diposisi awal. Dengan begitu, akan terjadi perubahan jarak antara struktur jari yang bergerak dan tidak bergerak. Pada akhirnya, perubahan inilah yang menimbulkan perubahan nilai kapasitansi kedua jari tersebut. Perubahan kapasitansi yang terjadi kemudian digunakan sebagai indikator nilai dari suatu gaya yang akan diterima oleh MEMS elektroda.

2.2 PROSPEK MEMS ELEKTRODA

Untuk memenuhi tuntutan pasar dan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, menuju perangkat yang semakin fleksibel, berukuran kecil, namun memiliki performa yang baik, maka dilakukan penelitian terus menerus. Pada tahun 1960, Richard P. Feynmann, nobelis fisikawan 1965, memberikan pidato mengenai 'Ada Banyak Ruang di Bagian Bawah' pada tahun 1992, dimana pidatonya berisi mengenai manipulasi dan mengendalikan hal-hal dalam skala yang sangat kecil [6]. Pada akhirnya, impian ini sebagian telah menjadi kenyataan dengan hadirnya MEMS (*Micro Electro Mechanical System*). Beberapa definisi MEMS oleh M. Bao dan W. Wang yang dituangkan oleh Menozzi pada tahun 2000:

1. MEMS ialah miniatur perangkat yang berupa susunan komponen elektrik dan mekanik dan diproses dengan menggunakan teknik proses *batch integrated circuit* (IC) [7]

2. MEMS merupakan integrasi dari 4 elemen, yaitu mekanik, sensor (*microsensor*), actuator (*microactuator*) dan komponen elektronik (*microelectronics/ASIC*), yang dikemas dalam single chip substrate Silicon dengan menggunakan *micro-fabrication* [8]

- Komponen mekanik MEMS mengkonversikan energi listrik menjadi energi mekanis, serta merekonversikan kembali menjadi energi listrik.
- *Microsensor* digunakan untuk mendeteksi perubahan lingkungan sistem melalui *microelectronics/ASIC*.
- *Microactuator* melakukan reaksi dan membuat bentuk perubahan kepada lingkungan
- *Microelectronics/ASIC* memproses informasi dan signal.

Yang perlu kita perhatikan bahwa komponen elektronik difabrikasi dengan menggunakan tahapan teknologi proses yang biasa digunakan dalam proses pabrikan IC (*Integrated Circuit*), sedangkan komponen MEMS difabrikasi dengan menggunakan teknologi *micromachining* yang akan membuang bagian wafer Silicon tertentu maupun menambahkan layer struktural mekanikal baru.

MEMS yang banyak digunakan saat ini hanya berbobot delapan per sejuta gram, seperti pada *gyroscope*. MEMS akan terlihat seperti rangkaian IC biasa, dengan sebuah sistem mekanik yang mempergunakan massa yang sangat kecil, batang dan pegas bergerak. Pembuatan sistem mekanik kecil tersebut saat ini telah dimungkinkan dengan adanya teknologi produksi semikonduktor dan proses fotolitografi.

Masalah MEMS seperti yang ditekankan pada pertemuan *Transducer '87* di Tokyo, Jepang adalah mengenai struktur permukaan *micromachined* dan bagaimana aktuator disajikan, pemanfaatan bahan dan komponen resonan (kuarsa kristal, keramik dan gelombang akustik permukaan / *SAW filter*). Dari masalah tersebut, kita dapat menyimpulkan bahwa MEMS memiliki keunggulan dalam beberapa bidang, yaitu [9] [10]:

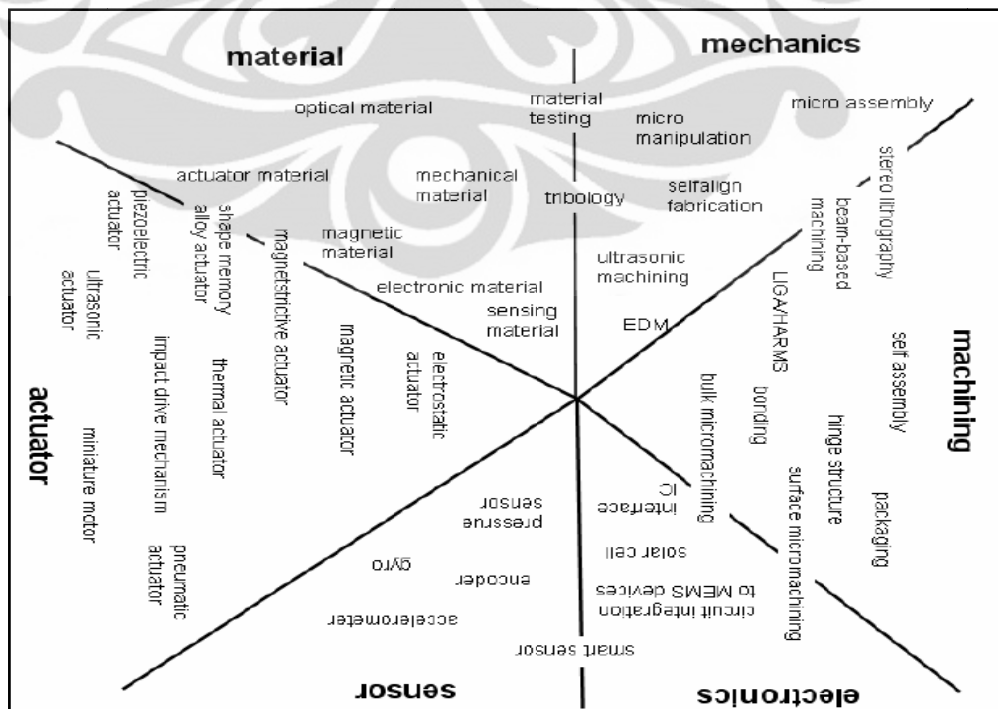
1. Kinerja komponen baik
2. Faktor kualitas Q (*Q-factor*) yang tinggi
3. Ketergantungan termal baik

4. Stabilitas
5. Praktis dibandingkan komponen diskrit
6. Mampu mengkonversi frekuensi (mixing) dan switching
7. Konsumsi daya DC yang sangat kecil sehingga dapat menghemat daya

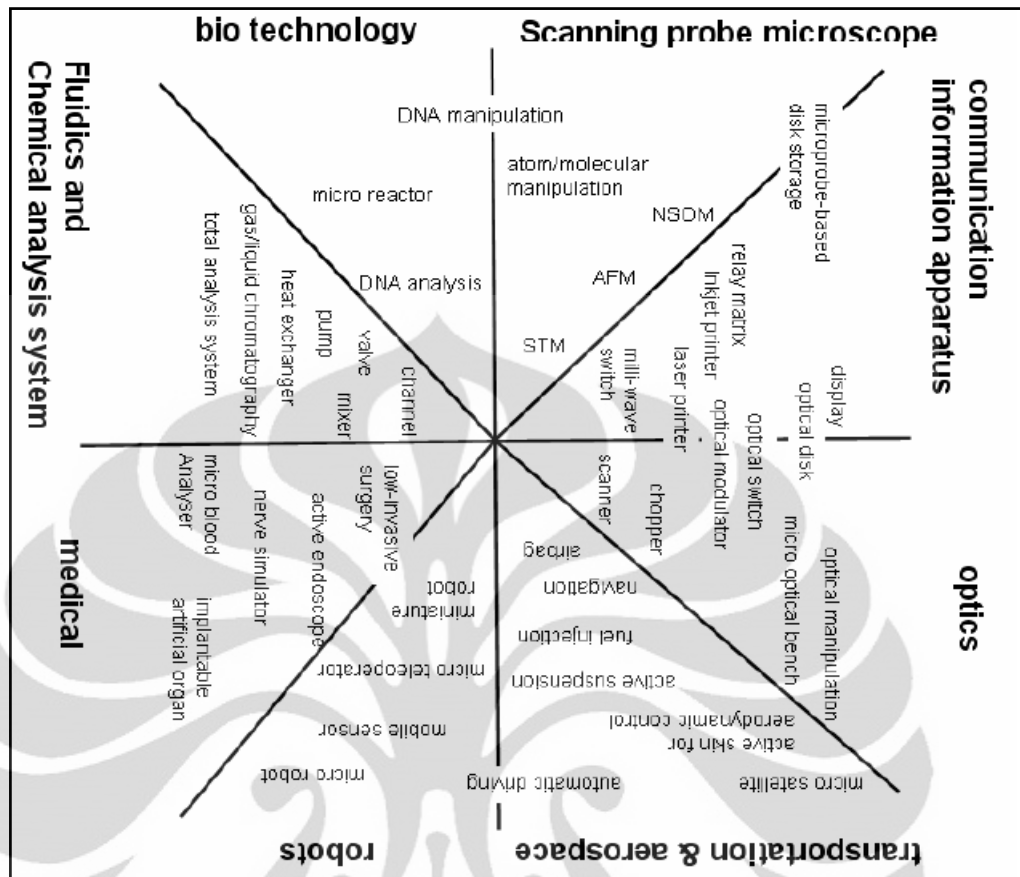
Saat ini, aplikasi MEMS yang sedang dikembangkan adalah dalam bidang kedokteran dan farmasi, fotografi, otomotif dan peralatan elektronik lainnya. Pada tahun 1988, Gabriel mengungkapkan mengenai produk teknologi MEMS yang sudah dikomersialisasikan meliputi *accelerometers*, *gyroscopes*, *display projection* dan *microfluids*, aplikasi DNA *sequencing* serta *switch optik* untuk *aerodinamics control* pesawat terbang dan komunikasi *nirkabel system* [7]

Tabel 2.1 Aplikasi MEMS dalam berbagai sektor [1]

Application sectors	2000 (Millions USD)	2004 (Millions USD)	CARG (%)
IT/peripheral	8,700	13,400	11.5
Medical/Biochemical	2,400	7,400	32.5
Industrial/Automation	1,190	1,850	11.6
Telecommunications	130	3,650	128.1
Automotive	1,260	2,350	16.9
Environmental Monitoring	520	1,750	35.4



Gambar 2.3 Pemetaan MEMS divais dan teknologinya [1]



Gambar 2.4 Pemetaan aplikasi MEMS [1]

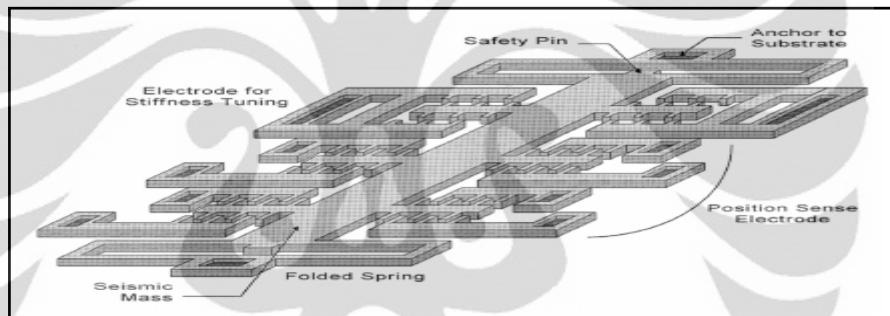
Untuk pengembangan lebih lanjut dalam bidang MEMS, integrasi dengan perangkat microelectronic IC akan semakin erat. Dari gambar berikut, kita dapat melihat betapa besar dan mendalam integrasi antara mekanik dan transistor dalam membangun divais VLSI IC. Seperti yang diungkapkan oleh Senturia pada tahun 1990, meskipun MEMS hampir sama dengan IC biasa, namun *driving force* dan paradigma desain sangat berbeda. *Driving force* dari suatu microsensors development adalah litografi dan menggunakan teknologi planar, *batch fabrication* (biaya murah), *microelectronic infrastructure* (kebutuhan capital) dan *micromachining technologies* (struktur mekanikal). Dalam struktur kecil, IC domain lebih kecil, cepat dan dapat memuat lebih banyak komponen, sedangkan *microsensor* domain kurang dalam persentasi presisi, tidak ada kecepatan sirkuit terbatas dan tidak dapat menghitung perangkat yang terbatas

2.3 BENTUK *PROOFMASS*

Banyak penelitian dilakukan berfokus untuk memodifikasi bentuk geometris dari MEMS elektroda untuk memvariasikan metode pendeteksian kapasitifnya. Dengan dilakukan variasi, diharapkan performa yang diperoleh akan semakin optimum. Salah satu variasi yang dapat dilakukan untuk MEMS elektroda berdasarkan sistem *mass-springdapshot*, dengan tiga parameter modifikasi (massa/berat, konstanta pegas, dan koefisien damping) [12]. Secara umum, bentuk geometri *proofmass* MEMS elektroda menyerupai akselerator MEMS, yaitu :

1. *Fishbone proofmass*

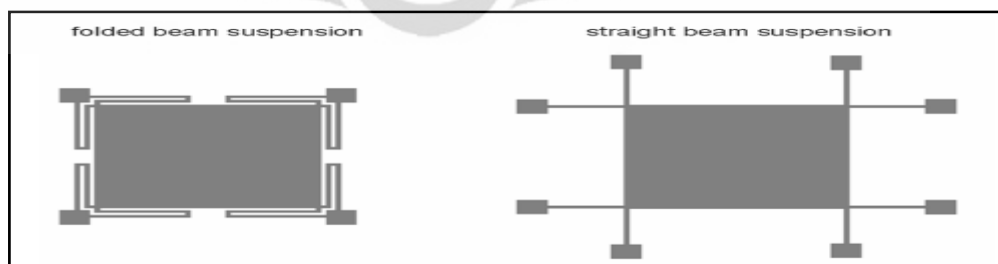
Fishbone proofmass dari MEMS terdiri atas *finger-finger* yang berbentuk menyerupai tulang ikan (*fishbone*) atau sisir [12]



Gambar 2.5 *Fishbone proofmass* [1]

2. *Platted proofmass*

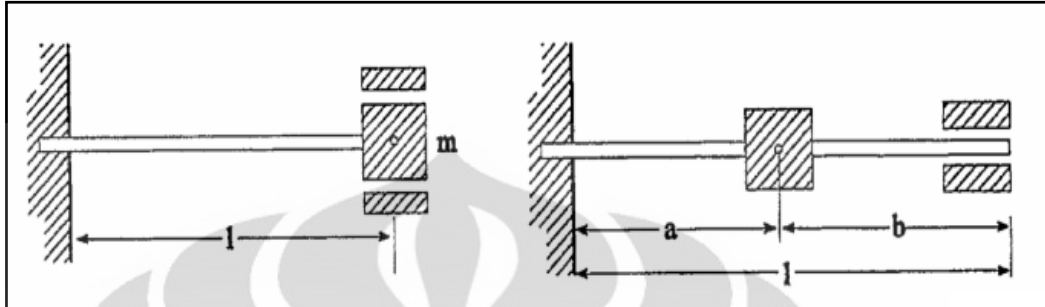
Platted proofmass merupakan proses standard MOS 14 – mask 0,8 μ m. Biasanya divais merupakan IC terintegrasi dengan CMOS untuk elemen pendeteksian berupa plat [12]



Gambar 2.6 *Platted proofmass*[1]

3. Cantilever

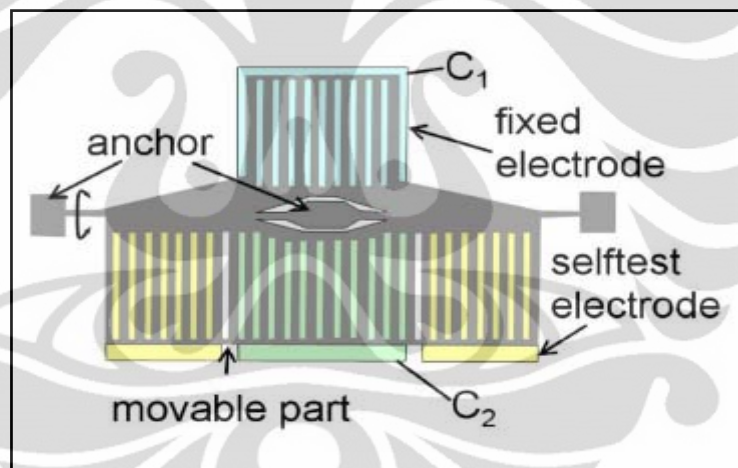
Cantilever merupakan penyangga yang berfungsi sebagai *array* dari *microswitch* akselerator



Gambar 2.7 Cantilever [1]

4. Asimetris

Asimetris merupakan mesin mikro 2 lapisan permukaan akselerometer kapasitif yang disusun secara asimetris

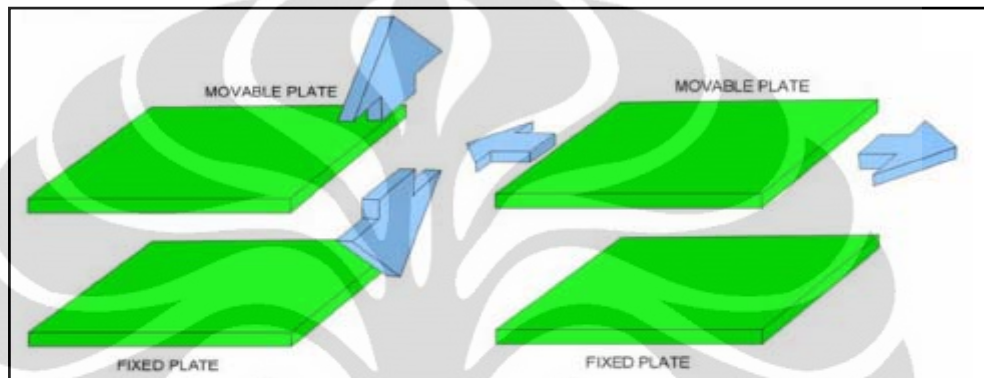


Gambar 2.8 Akselerometer kapasitif asimetris [1]

Untuk design MEMS elektroda sensor dielektrik spektral molekuler, penulis memilih bentuk fishbone proofmass. Hal ini berdasarkan penelitian dan survey peneliti dari berbagai sumber. Hingga saat ini, penelitian dilakukan berfokus untuk memodifikasi bentuk geometris dari MEMS elektroda untuk memvariasikan metode pendeteksian kapasitifnya. Diharapkan, dengan variasi yang tepat, akan diperoleh performa yang optimum. Kelebihan dari *fishbone proofmass* adalah konsumsi daya yang rendah, dan kemungkinan variasi yang lebih banyak.

2.4 ARAH PERGERAKAN

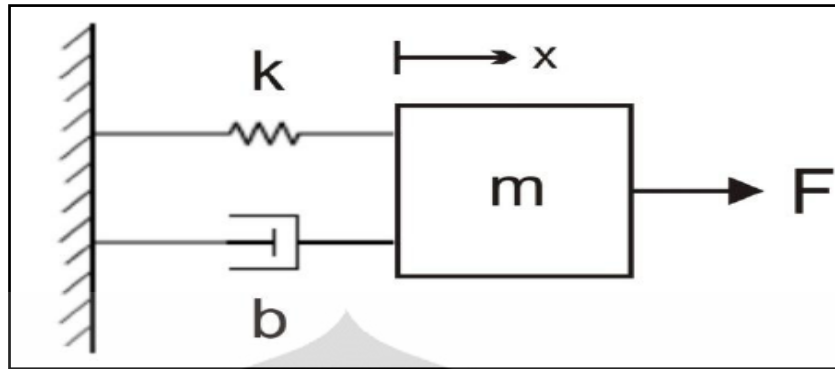
Berdasarkan arah pergerakannya, MEMS elektroda menggunakan pendeteksian mode kapasitif, dimana pendeteksi kapasitif terdiri atas dua plat paralel, dengan satu plat yang dapat bergerak, dan plat lainnya dalam keadaan tetap (diam, *fixed*). Pergerakan plat akan menciptakan perbedaan kapasitansi, yang pada akhirnya akan memberikan efek pada koefisien damping dan berat akibat pergerakan tegak lurus secara lateral



Gambar 2.9 *Capacitive sensing possibility fixed – movable plates (a) gap variation dan (b) area variation [1]*

2.5 SISTEM MASSA SPRING DAMPING

Kerja dan respons dari suatu MEMS elektroda sangat dipengaruhi oleh ketiga komponen utama, yaitu massa (m), *spring constant* / konstanta pegas (k) dan *damping coefficient* / koefisien damping (b). Massa dalam hal ini merujuk pada massa *proofmass* yang didalamnya juga termasuk struktur jari (*finger*) yang bergerak. Untuk skripsi ini, penulis mengasumsikan bahwa struktur *proofmass* terdiri dari anyaman, dimana menyerupai papan catur secara garis besar. Untuk konstanta pegas, nilainya sangat dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran pegas yang dihubungkan dengan *proofmass*. Sedangkan komponen utama terakhir, yaitu koefisien damping, sangat dipengaruhi oleh jarak antara *finger*, ukuran, dan banyaknya *finger* yang dipergunakan. Nilai koefisien damping, ditimbulkan oleh dua buah struktur *finger* (*fixed* dan bergerak) yang diletakkan secara berhadapan dengan jarak tertentu (diletakkan secara paralel). Bahan diantara kedua jenis *finger* tersebut juga sangat mempengaruhi besarnya nilai damping pada MEMS elektroda.



Gambar 2.10 Pemodelan sistem *massa-spring-damping* [17]

Untuk skripsi ini, penulis akan mencoba untuk menganalisa sistem massa yang dipergunakan dengan menggunakan pemodelan system massa spring damping. Pemodelan ini sangat umum dipergunakan, karena kemudahan dan kesederhanaanya. Variabel x merupakan pergeseran akibat dari massa yang dikenakan gaya dari luar sebesar F . Dengan menggunakan prinsip dan teori dasar getaran mekanik, maka sistem *massa spring damping* diatas dapat digambarkan dengan persamaan sebagai berikut

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F \quad (2)$$

Dengan m adalah massa dari *proofmass* (kg), b adalah *damping coefficient* (kg/s). Berturut-turut k , x dan F adalah *spring constant*, *displacement*/pergeseran (m) dan gaya luar (N) [19]

2.5.1 Massa *Proofmass*

Salah satu komponen terpenting dari MEMS elektroda sensor dielektrik spektral molekuler yang telah dirancang dan akan disimulasikan oleh penulis adalah *proofmass*. *Proofmass* dapat dianalogikan sebagai struktur dasar dari komponen MEMS sensor ini. Besar kecilnya dimensi dari *proofmass* ini akan memberikan pengaruh signifikan secara langsung terhadap massa dari *proofmass*. Perubahan massa akan mempengaruhi frekuensi natural dari suatu MEMS elektroda. Berdasarkan analisa rumus dan simulasi yang dilakukan oleh penulis, akan terbukti kemudian bahwa semakin besar massa *proofmass*, maka akan mengakibatkan penurunan frekuensi natural (massa *proofmass* berbanding terbalik dengan frekuensi natural)

Dalam comb *finger* kapasitif, struktur proofmass dari MEMS elektroda ini terdiri dari bagian tengah *proofmass* yang dikenal dengan sebutan *seismic mass*, dan juga struktur *finger* yang dapat bergerak yang menempel pada *seismic mass*.

Massa *proofmass* dapat ditentukan dengan cara menjumlahkan massa *seismic mass* dengan massa dari semua *finger* yang bergerak. Massa dari *proofmass* ini nilainya juga tergantung dari bahan yang dipergunakan untuk menyusun *proofmass* tersebut. Pada skripsi ini, penulis terlebih dahulu mendesign bentuk dari MEMS elektroda sensor dielektrometrik spektral molekuler menggunakan material silicon, baru kemudian melakukan perhitungan mengenai luas permukaan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut

$$m = \rho V \quad (3)$$

Dimana m adalah massa benda (kg), ρ *density* / massa jenis (kg/m^3) dan V adalah volume benda (m^3). Massa jenis silicon = 2328 kg/m^3 , tebal *proofmass* = $40\mu\text{m}$.

Proofmass yang didesign penulis, memiliki keunikan tersendiri karena memiliki *seismic mass* yang berlubang-lubang menyerupai papan catur. Ukuran lubang adalah $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$. Untuk penyederhanaan demi kepentingan simulasi, massa jenis *seismic mass* akan dimanipulasi terlebih dahulu sebelum simulasi dijalankan. Untuk *finger* akan tetap dipergunakan massa jenis silicon biasa, karena *finger* tidak memiliki lubang yang menyerupai papan catur pada bagian tengahnya.

Untuk mengetahui berapa besarnya nilai massa jenis substitusi, terlebih dahulu kita harus mengetahui berapa luas daerah permukaan design yang dipergunakan. Luas daerah permukaan yang akan dihitung, dapat dilihat dari rancang awal design yang memanfaatkan Intellimask. Akan lebih mudah untuk menghitung berapa banyaknya kotak-kotak kecil dengan ukuran $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ secara langsung daripada jika kita menghitungnya dengan mempergunakan perhitungan yang panjang. Massa sebenarnya akan diketahui ketika luas permukaan dari design, dikalikan dengan ketebalannya lalu kemudian dikalikan lagi dengan massa jenis yang sebenarnya.

Yang perlu diingat untuk menjaga tingkat kevalidan simulasi adalah, massa benda selalu konstan. Oleh karena itu, massa benda yang sebenarnya dan massa benda yang akan dipergunakan dalam design yang akan disimulasikan dengan 3Dbuilder harus sama. Ketika massa benda sebenarnya sama dengan

massa benda simulasi, maka akan diperoleh massa jenis sebenarnya dikalikan dengan volume sebenarnya akan sama hasilnya dengan massa jenis substitusi dikalikan dengan volume design (dimana design tidak mempergunakan lubang-lubang). Akan diperoleh hasil yang sesuai dengan estimasi awal yaitu lebih kecil. Hal ini disebabkan volume benda design lebih besar dibandingkan volume sebenarnya karena tidak mempergunakan lubang.

Besarnya massa substitusi yang dipergunakan untuk simulasi adalah sebesar $1747,1255 \text{ kg/m}^3$.

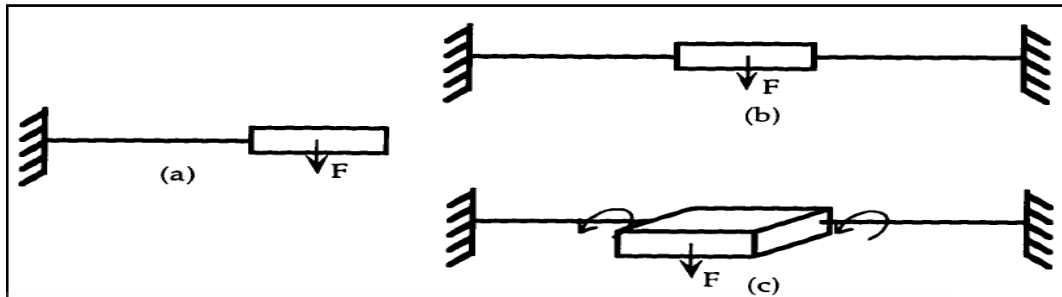
2.5.2 *Spring Constant* (Konstanta Pegas)

Parameter penting lain yang tidak kalah penting dari *proofmass* adalah *spring constant* / konstanta pegas. Konstanta pegas ini memiliki nilai yang besarnya ditentukan oleh bentuk dan dimensi dari tether yang dipergunakan dalam MEMS elektroda sensor dielektrometrik spektral molekuler.

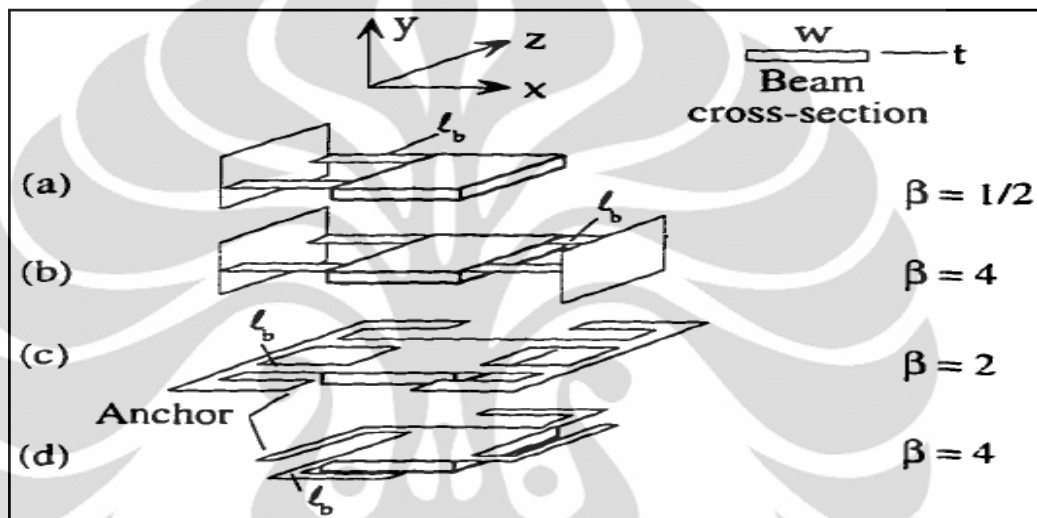
Tingkat sensitivitas MEMS elektroda sensor dielektrometrik spektral molekuler berbanding terbalik. Untuk memperoleh tingkat sensitivitas yang tinggi, nilai k harus dibuat seminimal mungkin sesuai arah akselerasi MEMS elektroda sensor. Lebih jauh lagi, MEMS elektroda sensor dielektrometrik spektral molekuler ini juga membutuhkan tingkat sensitivitas *cross-axis* mekanisme suspensi yang rendah. Oleh karena itu, ditetapkan beberapa jenis *beam* berdasarkan strukturnya:

1. *Beam* yang panjang dan tipis, dengan *ratio cross-sectional* tinggi didesign sebagai *cantilevers*
2. *Clamped-clamped bridge* dan dua titik torsional *beam* sebagai suspensi *seismic mass element*

Alasan utama dipergunakan struktur *beam* sebagai pembeda adalah karena struktur *beam* tersebut mudah dibentuk secara *micro-machine*. Untuk aplikasi MEMS divais sebenarnya, apabila nilai *deflections* kecil, maka *beam deflection* berbanding lurus dengan *deformation force* [21].



Gambar 2.11 Konfigurasi beam :
 (a) cantilever, (b) bridged, (c) two point torsional beams [17]



Gambar 2.12 Ekspresi *spring constant k* pada sumbu *y* berbagai design [17]

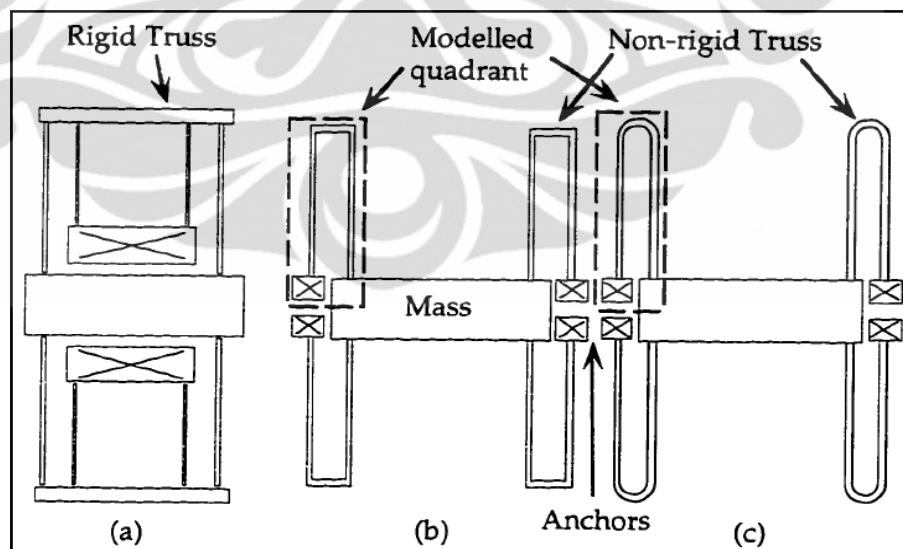
Jika kita perhatikan ekspresi diatas, ada beberapa hal yang harus diasumsikan mengenai titik masa pada (a) *deflections* kurang dari tebal beam, *t* pada (b), *rigid end truss* di (c) dan rasion panjang *thigh tether* terhadap *shin tether* di (d). Tabulasi ini dapat dipergunakan untuk perhitungan awal, dan juga memberikan keuntungan ketika membuat perbandingan analisis terhadap suspensi yang berbeda.

Untuk luas area maupun *beam segment analysis* menggunakan design diatas, *cantilever* memiliki nilai *k* paling rendah, sedangkan *bridge* dan *crab leg* memiliki nilai *k* yang paing tinggi dibandingkan suspensi *tether* lainnya. Kita harus memperhatikan aplikasi suspensi *cantilever beams* sebelum dipergunakan, karena untuk beberapa aplikasi, *cantilever* tidak sesuai dengan *angular displacement* massa dan *sensing capacitive plate*. Hal ini dapat diatasi dengan *tether* yang lebih seimbang seperti *bridged*, *folded beams* (FB) maupun *crableg* (CL) design.

Diantara design yang seimbang ini, *folded beam* memiliki nilai *constant spring* terbesar sehingga memperbolehkan nilai deflections yang besar pula tanpa menimbulkan "spring tightening effect" seperti pada *bridged design*. *Bridged design* memiliki beberapa kelemahan mendasar, selain mudah mengalami *spring tightening effect*, nilai *spring constant* dapat meningkat secara drastis. FB dan CL suspensi dapat dipergunakan untuk melepaskan axial stress. FB design merilis residual stress dengan cara ekspansi ataupun kontraksi, sedangkan CL design merilis stress dengan melakukan rotasi satu kecil struktur tersuspensi yang ada.

Berdasarkan analisa diatas, maka penulis menyimpulkan, untuk mendesign sebuah MEMS elektroda sensor dieletrometrik spektral molekuler akan lebih baik dengan menggunakan design cantilever yang dikombinasikan sedemikian rupa dengan FB agar menjadi seimbang.

Jika kita menganalisa efek *non-rigid end truss* pada *spring constant* k dan pengaruhnya secara keseluruhan terhadap *cross-axis sensitivity* struktur, kita akan menemukan bahwa dengan membuat ujung *truss tether non-rigid*, energi potensial yang tersimpan didalam suspensi akan terdistribusi menyeluruh di dalam *beam* seperti pada *truss tether*. Hal ini akan menyebabkan penurunan nilai *spring constant* k_y dan k_x , jika dibandingkan dengan *conventional stiff truss* dari FB.

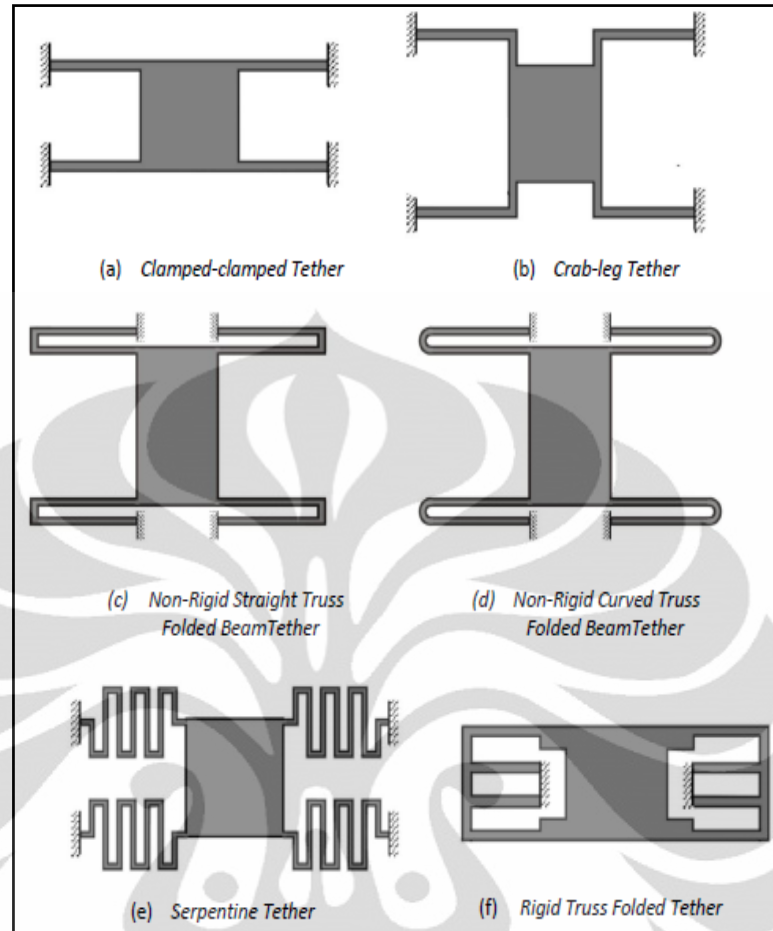


Gambar 2.13 Conventional folded beam design dengan rigid truss
 (a) Non rigid truss design straight, (b) curved, (c) truss[17]

Analisa yang dilakukan meliputi penggantian *stiff truss* dengan pengganti satu, seperti yang ditunjukkan gambar dibawah ini. Kedua *truss tether* yang dipergunakan lurus dan melingkar dengan *flexural rigidity* EI , dibandingkan dengan *beam segment*, akan menghasilkan *non-zero rotation* pada ujung *beam*. Dengan mengacu pada *linear beam deflection theory* yang digarisbawahi untuk dipergunakan pada MEMS *suspension designs*, kita perlu memperhatikan ikatan pada beam dan efek *shear* serta *stretching* dapat diabaikan selama mereka dapat diasumsikan memberi kontribusi yang sangat kecil terhadap sistem pegas secara keseluruhan. Hal ini dapat dilakukan dengan cara:

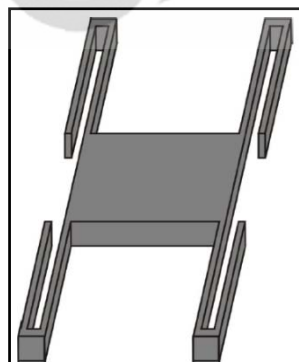
1. Mengurangi permasalahan untuk mengambil keuntungan dari bentuk simetri geometri
2. Menentukan *boundary conditions* (BC) untuk suspensi
3. Menggambar *free body diagram*
4. Menghitung besarnya *deflection* δ untuk setiap suspensi *segment* untuk setiap unit gaya F yang dikenakan
5. Menghitung nilai k_x dan k_y menggunakan F/δ

Terdapat beberapa bentuk tether yang biasa dipergunakan untuk comb finger kapasitif MEMS elektroda, antara lain *clamped-clamped tether*, *crab-leg Tether*, *non-rigid Straight Truss Folded Beam* (STFB), dan *non-rigid Curve Truss Folded Beam* (CTFB), *serpentine tether*, *rigid truss folded tether*. Dari sekian bentuk finger, hanya dua bentuk yang umum dipergunakan, yaitu STFB dan CTFB. Keduanya dibedakan berdasarkan bentuk truss tether yang dipergunakan. Untuk STFB digunakan *truss tether* yang lurus, sedangkan untuk CTFB dipergunakan *truss tether* yang melingkar membentuk setengah lingkaran



Gambar 2.14 Bentuk tether untuk comb finger kapasitif [17]

Pembahasan pada skripsi ini akan difokuskan pada rancang design tether menggunakan mode STFB. *Constant spring* dari rancang design STFB dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain panjang, lebar, tebal dan bahan yang dipergunakan pada tether tersebut.



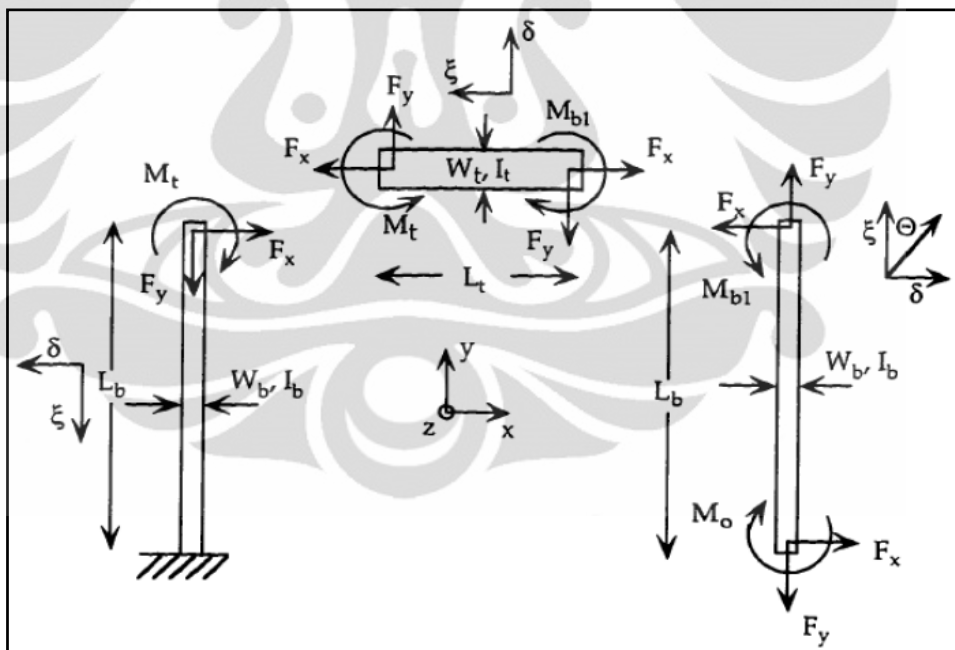
Gambar 2.15 Seismic mass dengan 4 STFB Tether [17]

Jika salah satu ujung diasumsikan *fixed* (tidak bergerak), dan ujung lainnya dibiarkan bebas (dapat bergerak), maka ketika diberikan suatu gaya akan terlihat adanya pergeseran pada ujung *tether* yang bebas akibat dari gaya yang diberikan pada *tether* yang dibiarkan bebas ujungnya tersebut. Nilai konstanta pegas dari *tether* tersebut dapat ditentukan dengan rumus berikut [20]

$$F = -kx \quad (4)$$

Dimana F adalah besarnya gaya yang diberikan, x adalah pergeseran dari ujung bebas pegas dan k adalah *spring constant*.

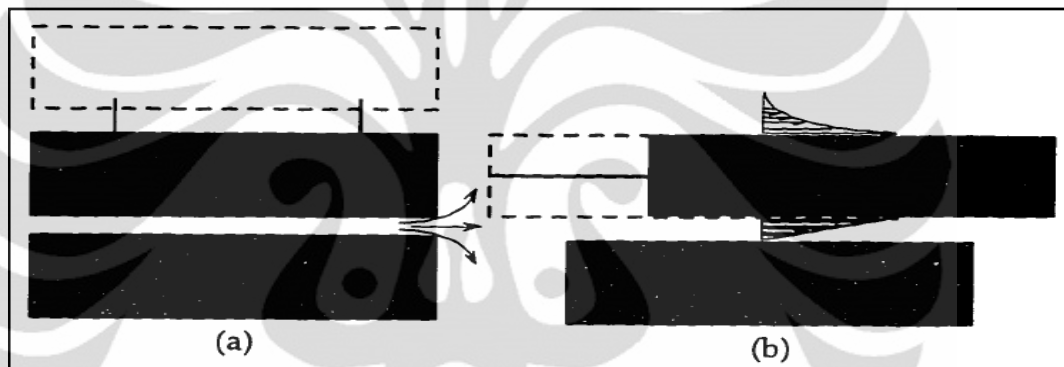
Untuk perhitungan besarnya *spring constant*, kita dapat mengurai pegas pada STFB ke dalam bentuk *free body diagram*. Tentukan salah satu bagian ujung *tether* yang mana yang akan dibuat *fixed* dan ujung lain diberikan gaya terhadap sumbu x dan sumbu y , maka nilai constant spring pada sumbu x (k_x) dan sumbu y (k_y) akan dapat dicari dengan menggunakan pendekatan persamaan energi potensial sebuah beam dan juga teorema Castigliano kedua [21]



Gambar 2.16 Free body diagram STFB analysis [17]

2.5.3 Damping Coefficient (Koefisien Damping)

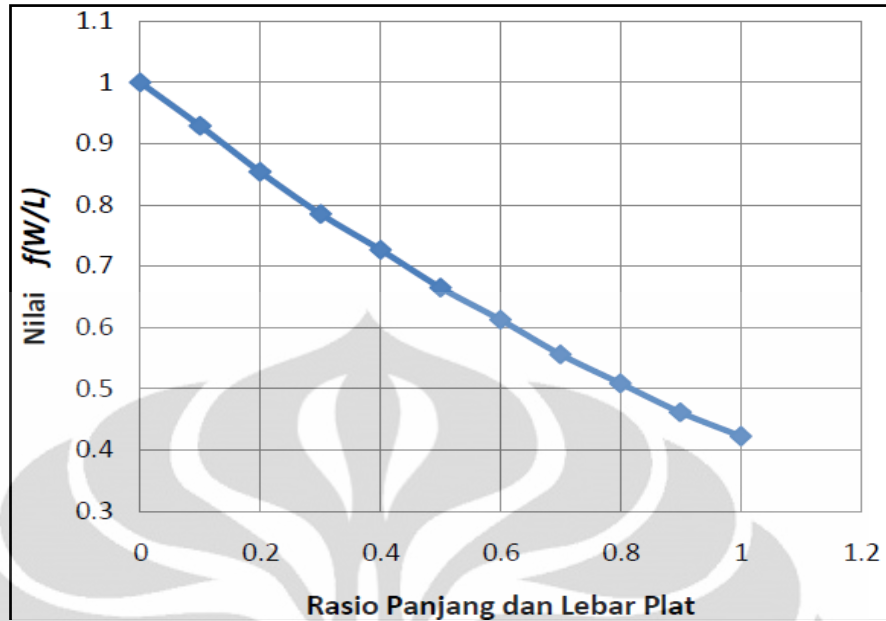
Berdasarkan manifestasi bentuk damping, damping dapat dibedakan dalam 2 tipe, *squeeze film damping* dan *viscous drag sampling*, tergantung pada pergerakan elemen inersia dan elektroda yang terpasang secara relatif terhadap *stationary structure*. Pergerakan awal, *proximity massa* serta suspensi *beams* yang relatif terhadap *element fixed* lainnya menunjukkan salah satu dari dua bentuk ini adalah mekanisme yang dominan. *Squeeze film damping* adalah mekanisme yang umum dipergunakan untuk pembuatan *sensing structures* yang memvariasikan *gap*, sedangkan *viscous drag* mendominasi untuk area struktur yang bervariasi. *Damping coefficient* diasumsikan linear dan memiliki damping factor sebesar b . Lebih lanjut lagi, dalam skripsi ini akan difokuskan pada *squeeze film damping*.



Gambar 2.17 Mekanisme damping
(a) *squeezed film variasi struktur gap* (b) *viscous drag struktur area* [17]

Ketika dua buah plat diletakkan berhadapan satu sama lain, serta terdapat gas ataupun cairan diantara mereka, maka kedua plat tersebut akan bergerak saling berdekatan dan menimbulkan redaman. Daya redaman ini menghilangkan sebagian energi kinetik dari plat yang bergerak, dimana nilainya dipengaruhi oleh parameter viskositas bahan yang terletak diantara kedua plat tersebut dan luas penampang plat. Redaman yang ditimbulkan ini, biasa disebut dengan *squeeze film damping*.

Fenomena inilah yang terjadi pada dua buah struktur *finger* dari *comb finger* kapasitif MEMS elektroda, pada saat struktur *finger* yang menempel pada *proofmass* mendekati struktur *finger* yang *fixed* akibat gaya dari luar.



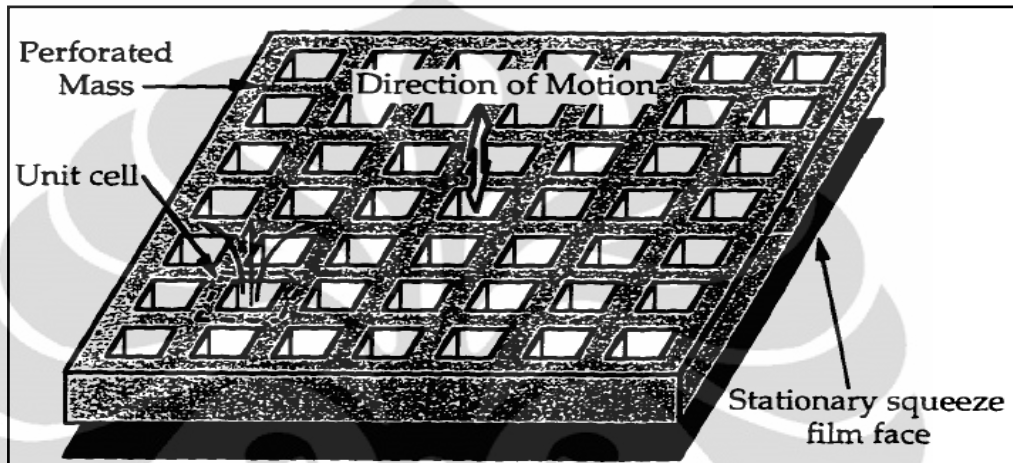
Gambar 2.18 Grafik nilai $f(W/L)$ fungsi rasio panjang dan lebar plat [17]

Kita perlu memperhatikan hubungan antara *damping coefficient* dengan dimensi divais dan gap antar elektroda. Dalam kasus *plate* yang diletakkan paralel untuk mendapatkan efek kapasitif dimana permukaan inertial elemnt membentuk elektroda yang menyerupai kapasitor. Tentu saja hal ini akan menambah ukuran massa dan luas permukaan sehingga akan mempengaruhi efek sensitivitas, demikian pula dengan damping.

Pendekatan secara langsung untuk mengurangi nilai damping dengan memperhatikan tingkat sensitivitas, adalah dengan melakukan penebalan massa dimana mengurangi batas dimensi massa *plate*. Cara ini akan meningkatkan tingkat sensitivitas mekanik, namun mengurangi sensitivitas elektrik dan kapasitif. Damping juga dapat dikurangi dengan cara meminimalisasi tekanan di dalam MEMS elektroda yang akan berujung pada penurunan tingkat viskositas. Alternatif terakhir adalah melakukan perforasi pada massa *plate* ataupun *fixed sense* elektroda. Pengurangan damping rasion pada *squeeze film damping* paling mudah dengan cara mengatur tingkat sensitivitasnya.

2.5.3.1 Variasi Damping pada Permukaan Perforasi

Detail dan analisis yang akurat mengenai *squeeze film damping* terhadap bentuk geometri terperforasi dapat disimulasikan secara analogi elektrik. Selain itu, dapat dilakukan beberapa aproksimasi seperti total damping yang dipergunakan tergantung pada penambahan *damping faced* yang diletakkan secara seri oleh "n" individual plat yang diletakkan paralel (*cells*).



Gambar 2.19 Permukaan plat terperforasi bergerak menuju plat *fixed* dengan lapisan film dibagian tengah [17]

Dimana panjang plat dasar L digantikan oleh panjang efektif L_e . Nilai L_e jauh lebih kecil dibandingkan L . Hal ini akan menyebabkan peningkatan dimensi plat (meningkatkan nilai n) yang pada akhirnya berakibat pada peningkatan tingkat sensitivitas S_c dan S_d dengan tetap mempertahankan nilai $\frac{b}{m}$ sedemikian rupa. L_c dan L_h adalah ukuran *cell* dan lubang pada bagian dalam massa.

Desain ini dapat dioptimasi dengan melakukan perforasi pada element inersial yang terlindungi, melakukan penyimpanan S_d tanpa meningkatkan ukuran dimensi element inersia. Demikian pula dengan S_c , nilai S_c tidak akan terpengaruh jika elektroda sensor atau element inersia diperforasi

2.5.3.2 Variasi Damping pada Jarak Comb Fingers

Squeeze film damping antara elektroda yang pendek dan panjang, jauh lebih kecil daripada ukuran pasangan elektroda, walaupun damping sebanding dengan ukuran dimensi W .

Lebih jauh lagi, akan jauh lebih menguntungkan untuk menggunakan sejumlah finger yang kecil pada suatu plate yang besar yang dimanfaatkan sebagai elektroda sensor. Untuk alasan inilah, damping yang terlihat pada design lateral dari MEMS elektroda hanya berpengaruh sangat sedikit pada squeeze flim damping. Persamaan dibawah ini dipergunakan dengan mengalikan $2n$ untuk setiap set fingers dimana faces damping pada kedua sisinya (satu sisi maju mendekati dan sisi yang lain menjauhi elektroda yang fixed)

2.6 INTERFACE KAPASITANSI

Proses pendeteksian dapat dihitung dan disimulasikan dengan menggunakan metode perubahan kapasitansi. *Interface* kapasitansi memiliki beberapa fitur yang sangat menarik. Plat-plat yang diletakkan sejajar dengan jarak tertentu dapat berfungsi sebagai sensor dan aktuator. Kapasitor memiliki sensitivitas yang bagus dan mekanisme transduksi yang tahan terhadap temperatur. Pendeteksian kapasitif tidak bergantung pada material dasar, melainkan ditentukan oleh variasi kapasitansi ketika bentuk geometri kapasitor berubah. Untuk mempermudah simulasi dan perhitungan, diasumsikan efek fringing diabaikan [22]. Oleh karena itu, kapasitansi dari plat paralel tersebut sebesar

$$C = C_0 - \tau_0 \tau \frac{A}{d} \tau_A \frac{1}{d}$$
$$\epsilon_A = \epsilon_0 \epsilon_A \quad (5)$$

A merupakan luas permukaan elektroda, d merupakan jarak antar plat dan ϵ_A merupakan permitivitas material yang memisahkan kedua plat paralel. Perubahan pada salah satu parameter ini akan mengakibatkan variasi kapasitansi.

Metode ini telah digunakan secara meluas pada banyak aplikasi. Contoh aplikasi-aplikasinya antara lain sensor kimia yang bekerja berdasarkan prinsip perubahan kelembapan serta akselerometer. Aplikasi dari metode sensitivitas ini sangat luas. Salah satu contohnya adalah divais analog yang dipakai pada

jangkauan *comb* MEMS elektroda sensor dielektrometrik spektral sensing molekuler dengan gap yang berbeda-beda [22]. MEMS elektroda umumnya mempergunakan *proofmass* yang dapat bergerak. Rangka *proofmass* berbentuk *fishbone*. Pada *proofmass* dilengkapi sistem suspensi mekanik.

Plat-plat yang diletakkan secara paralel dapat digerakkan sedangkan plat-plat luar diluar *fixed*, keduanya merepresentasikan kapasitor pada sistem tersebut. Defleksi dari *proofmass* dapat diukur dengan menggunakan selisih nilai kapasitansi. Kapasitansi udara diantara plat dapat digerakkan dan plat *fixed* merepresentasikan kapasitor-kapasitor pada sistem tersebut. Defleksi dari *proof-mass* dapat diukur dengan menggunakan selisih kapasitansi [22].

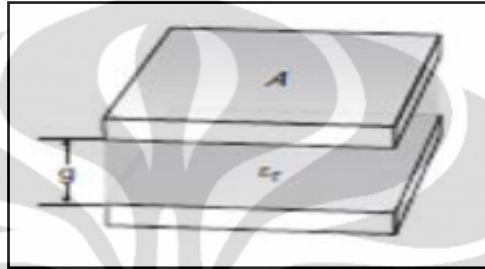
Ada beberapa parameter yang harus diperhatikan pada sensor dielektrometrik ini, antara lain adalah sifat *output* divais (analog atau *digital*), analisa jumlah axis dan jangkauan pengukuran divais, sensitivitas divais, *bandwith* yang merupakan frekuensi dimana divais digunakan untuk mengukur perubahan dalam akselerasi, serta karakter *noise* dari divais. Karakter *noise* ini sangatlah penting karena pada akhirnya akan digunakan sebagai acuan yang dapat mempengaruhi performa divais. *Noise* ini dapat disebabkan oleh getaran, sistem mekanik pegas, sinyal sirkuit *conditioning* dan sistem pengukuran divais tersebut.

2.7 MEKANISME SENSING (PENDETEKSIAN)

Sensing dapat didefinisikan sebagai sebuah kemampuan untuk mentransformasikan energi di sekitar lingkungannya menjadi energi di dalam sebuah sistem. Thermo-couple merupakan suatu proses sensing sederhana dengan cara mengubah temperatur udara menjadi sebuah sinyal listrik. Transformasi energi dilakukan oleh transduksi (bagian inti sensor). Suatu sensor MEMS dapat digunakan untuk mengukur parameter-parameter seperti tekanan, akselerasi, medan magnet, gaya, dan konsentrasi kimia. Prinsip transduksi ini kemudian dikembangkan dan diintegrasikan dengan proses miniaturisasi [13]. Proses pendeteksian kapasitif tidak bergantung pada material dasar, melainkan pada variasi kapasitansi yang terjadi pada saat terjadi perubahan bentuk geometri divais. Kapasitansi pada umumnya proporsional dengan

$$C \propto \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{g} \quad (6)$$

Dimana A merupakan luas permukaan elektroda, g merupakan jarak antar elektroda dan ϵ_r merupakan permitivitas material yang memisahkan elektroda (umumnya merupakan udara, dengan faktor proporsional). Proses pendeteksian MEMS memanfaatkan perubahan variasi ketiga parameter tersebut [13]



Gambar 2.20 Sensing kapasitif [18]

Mekanisme pendeteksian kapasitif sangat dominan digunakan dalam aplikasi MEMS. Surface micromachining dan bulk micromachining merupakan proses yang umum digunakan untuk memfabrikasi divais MEMS. Dibandingkan dengan sensor piezoresistive, sensor kapasitif memiliki tingkat sensitivitas yang jauh lebih tinggi, konsumsi daya yang jauh lebih kecil, tingkat noise yang lebih rendah, karakteristik DC yang lebih stabil, dan ketergantungan temperatur yang lebih rendah. Sirkuit conditioning dari elemen pendeteksian sederhana akibat struktur dan proses integrasi fabrikasi yang sederhana pula. Oleh karena itu, sensor kapasitif menjadi fokus perkembangan industri elektronik portable [13]

BAB III

DESIGN DAN OPTIMASI MEMS ELEKTRODA

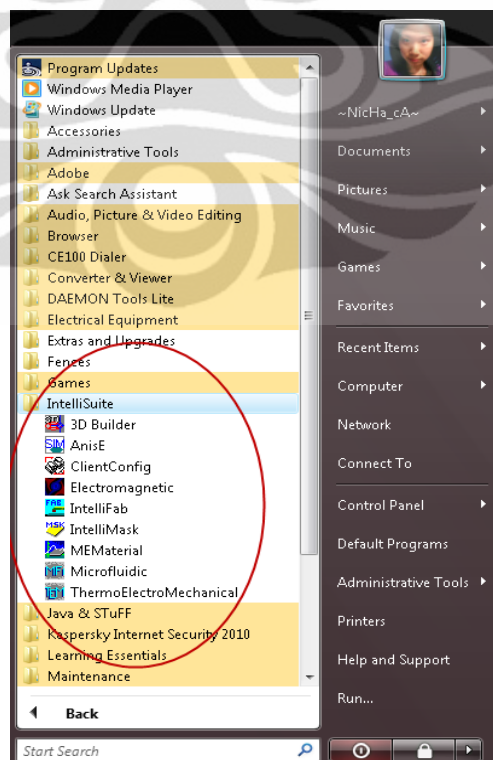
3.1 INTELLISUITE SIMULATOR OVERVIEW

MEMS elektroda merupakan dasar utama untuk sensor spektral molekuler . Sensor ini menggunakan kaidah elektroda bergerak (MEMS) sebagai elektroda pengukur kapasitansi dari bahan-bahan di atasnya (menggunakan konsep FEF). Untuk pembahasan pada bab ini, akan dirancang suatu design MEMS elektroda sensor spektral molekuler, dan akan disimulasikan dengan simulator khusus, meskipun perhitungan lebih lanjut harus dilakukan. Simulator yang dipergunakan adalah INTELLISUITE 2001, simulator program yang telah terintegrasi dengan tools design dan dapat menghasilkan model MEMS design yang akurat dan spesifik. Output design dapat dianalisa, ditampilkan dalam bentuk grafik dan diiterasi untuk membantu user menyelesaikan design. Program ini dapat berdiri sendiri, dengan kapabilitas meliputi

1. tampilan 2D dan tampilan 3D untuk kemudahan *editing* proses fabrikasi proses emulasi dan simulasi
2. 3D untuk model solid yang dibentuk dari 2D masks
3. *meshing models* dalam jumlah tertentu untuk semakin mengoptimalkan hasil yang diperoleh (hasil semakin mendekati nilai sebenarnya)
4. setup untuk *electric analysis*
5. setup untuk *mechanical analysis*
6. setup untuk *thermal* dan *electrothermal analysis*
7. setup untuk efek *piezoresistive*
8. setup untuk *inductance optic*
9. setup untuk *capacitance analysis*
10. setup untuk masalah fluidic
11. beberapa masalah yang saling terkait untuk mengutilisasi dua atau lebih penyelesaian bagi permasalahan komplikasi multi domain
12. setup dapat digunakan untuk menyelesaikan beberapa parameter variasi *sensitivity analysis*

13. *database queries* yang dapat mengekstrak *post processed* hasil simulasi dan mengurangi order model generation
14. simulasi tingkat tinggi untuk sistem model keseluruhan
15. perpustakaan *parametric electrochemichal* tingkat tinggi yang dilengkapi *underlying geometry*
16. perpustakaan yang mensupport *fluidic* level tingkat tinggi dan simulasi optik
17. layout *extraction* dari perpustakaan *parametric* untuk FEM validasi dari suatu model
18. dan masih banyak lagi fitur-fitur yang lain, yang sangat mendukung optimasi MEMS design yang telah dibuat sebelumnya.

Intellisuite memiliki menu yang terdiri dari perancangan design divais baik secara 2D (pembuatan masking), maupun secara 3D. Hasil perancangan tersebut dapat disimulasikan proses fabrikasinya, kemudian dapat dianalisa dengan beberapa modul analisa. Penulis melakukan 4 jenis analisa, antara lain *mechanichal analysis*, *electrostatic analysis*, *electromechanical analysis*, *shagging analysis* dan *thermoelectromechanical analysis*. Dengan terlebih dahulu membuat pemodelan secara 3D.



Gambar 3.1 Tampilan setelah IntelliSuite terinstall

Terlebih dahulu program Intellisuite diinstall pada CPU, hingga pada akhirnya kita dapat menemukan intellisuite folder pada start menu. Tampilannya kurang lebih seperti gambar diatas.

3.2 PEMODELAN MEMS SENSOR SPEKTRAL MOLEKULER

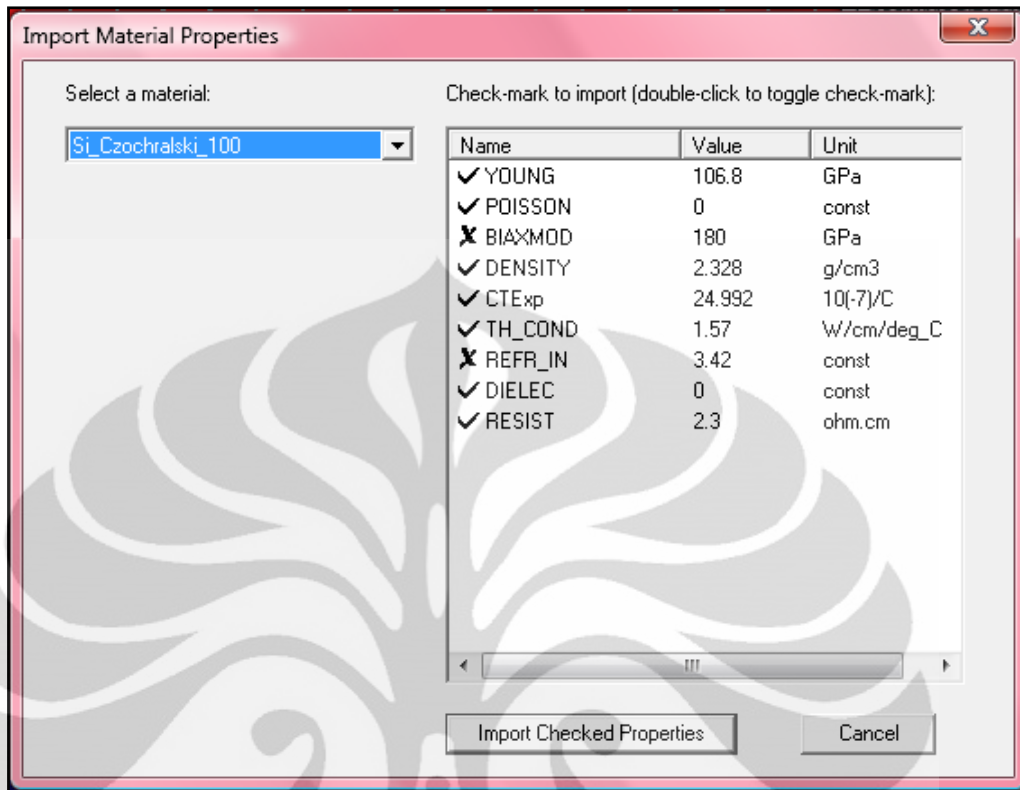
Langkah awal yang harus dilakukan dalam simulasi adalah membuat model MEMS elektroda untuk sensor spektral molekuler, dimana menggunakan kaidah elektroda bergerak untuk mengukur kapasitansi bahan-bahan diatasnya. Penulis mencoba mendesign menggunakan bahan Silicon.

Pemilihan material-material utama yang akan dipergunakan untuk aplikasi MEMS tidak dapat dilakukan secara sembarangan. Pemilihan tidak lagi difokuskan aspek mekaniknya, seperti *stress* internal yang kecil dan *controllable*, temperature proses yang rendah, serta tingkat kompatibilitas dengan komponen lain yang menghasilkan lapisan tebal yang sesuai dan sebagainya [13].

Kelebihan dari material silicon dan senyawanya adalah karakter mekanisnya yang kuat dan ringan serta *stress strain* dan *stress critical* yang besar sehingga tidak ada keterbatasan elastisitas pada temperature ruang sehingga material ini mampu pulih dari strain yang besar. Material silicon ini jarang menyebabkan kegagalan komponen pada MEMS. Selain itu, silicon juga memiliki koefisien *piezoresistif* yang besar untuk sensor pendeteksi dan juga material ini transparan pada gelombang telekomunikasi yang umum sehingga sangat bermanfaat untuk optikal MEMS.

Karakteristik bahan Silicon telah ada pada *database* Intellisuite, sehingga kita tidak perlu mencari-cari sumber dari luar lagi. Modifikasi pada density perlu dilakukan karena untuk simulasi dilakukan penyederhanaan dengan menganggap proofmass yang dipergunakan tidak memiliki lubang-lubang, padahal dalam keadaannya memiliki lubang-lubang. Sehingga akan mengakibatkan penurunan nilai density material Silicon

Berikut ini merupakan karakteristik Silicon Czochralski 100



Gambar 3.2 Spesifikasi Si_Czochralski_100

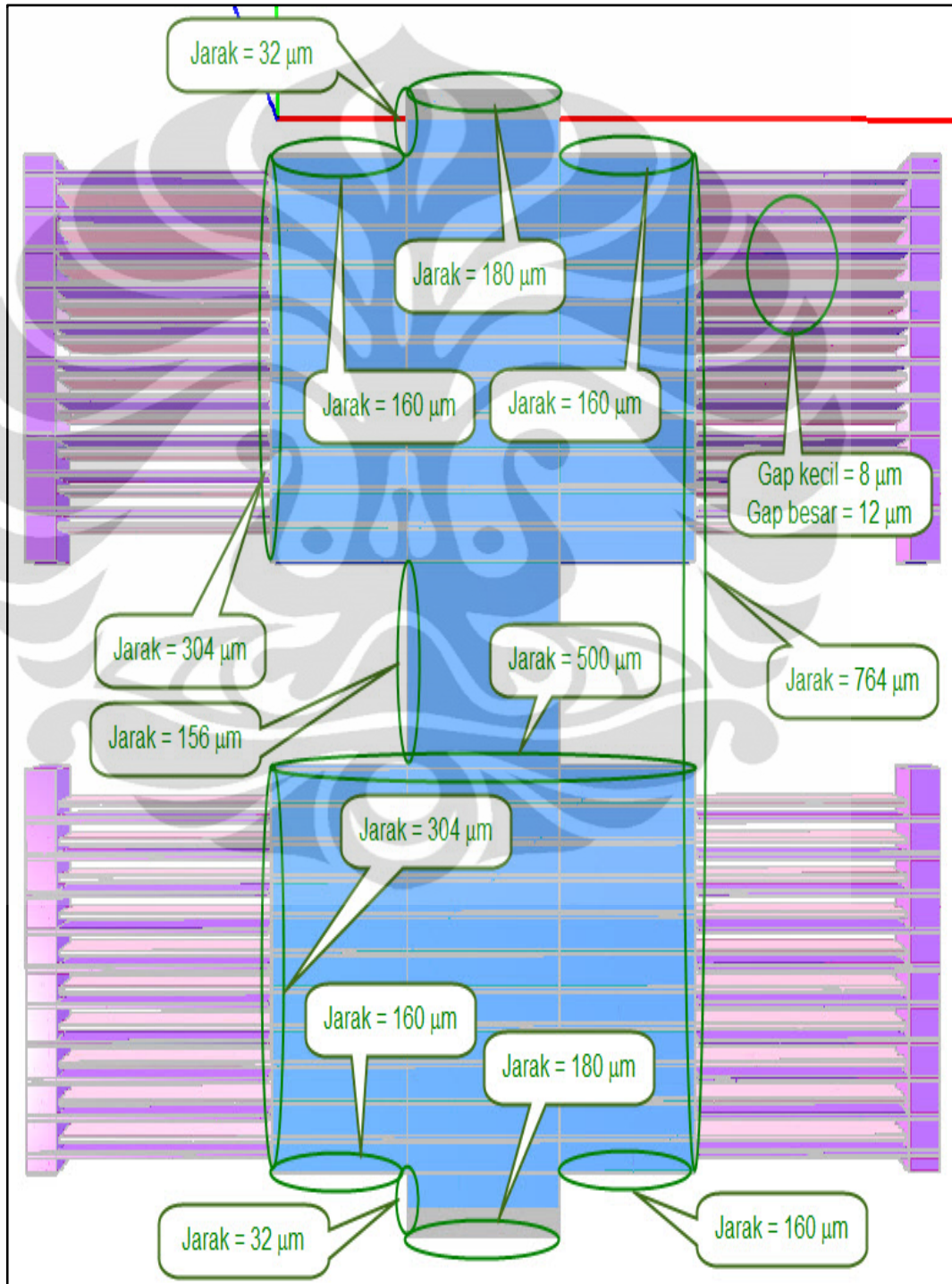
Seperti kita lihat, nilai *density* awal adalah 2,328 g/cm³. Nilai ini akan diganti menjadi 1,7471288 g/cm³, untuk mempermudah simulasi yang harus dilakukan. Ukuran design tidak akan diubah, sedangkan volume berubah. Hal ini mengakibatkan perubahan *density* pada design.

Penulis akan mempergunakan *proofmass fishbone*. Design dasar sensor yang akan dibentuk oleh penulis menggunakan design *proofmass fishbone* awal yang kemudian akan dioptimasi hingga mendapatkan frekuensi yang diinginkan. Simulasi dan optimasi akan dilakukan pada skripsi. Untuk skripsi ini, penulis baru merancang bentuk dan ukuran saja.

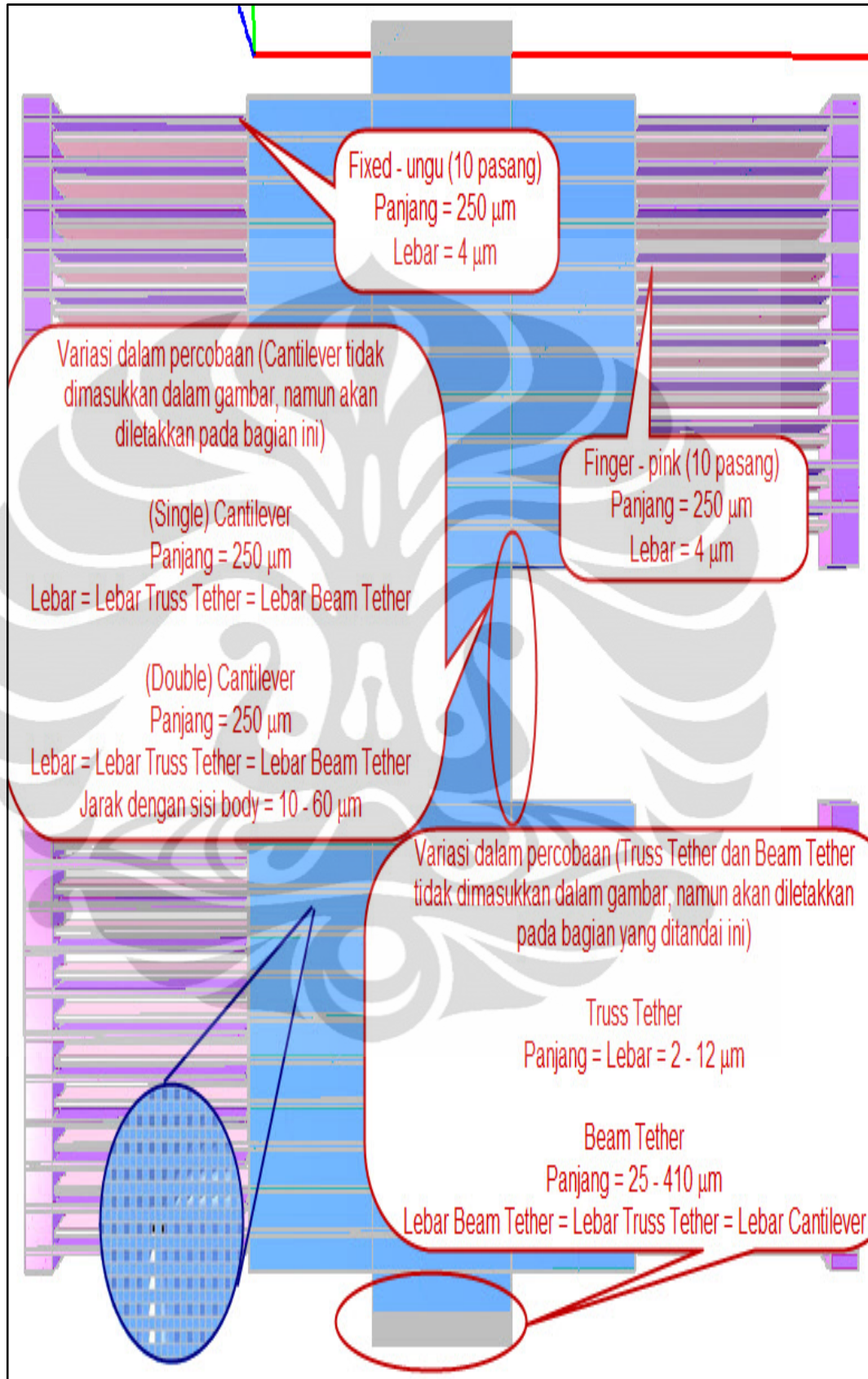
Perancangan dilakukan dengan menggunakan 3D builder. Beberapa warna dipergunakan untuk mempermudah penamaan dan setting simulasi. Ada beberapa warna yang perlu diketahui : biru muda = *proofmass*, merah muda = *finger*, ungu = fixed (*anchor*) dan kuning = *spring*

Spesifikasi rancangan keseluruhan berukuran 1000µm x 1000 µm x 40 µm (ketebalan diasumsikan sama semua untuk setiap bagian). *Proofmass* memiliki panjang 500mm karena setelah dilakukan beberapa kali simulasi awal, dengan

nilai $100\mu\text{m} - 500\mu\text{m}$, dengan range $50\mu\text{m}$, tidak diperoleh perubahan hasil yang signifikan pada frekuensi mekanis yang dihasilkan. Melainkan, ketika design menggunakan jarak proofmass $<500\mu\text{m}$, akan terjadi ketidak seimbangan ketika disimulasikan pergerakan secara 3D. Berikut ini adalah bagian yang akan selalu bernilai *fixed* (tidak berubah dan konstan) selama simulasi :



Gambar 3.3 Design 3Dbuilder yang belum disimulasikan (1)



Gambar 3.4 Design 3Dbuilder yang belum disimulasikan (2)

3.3 SIMULASI PEMODELAN

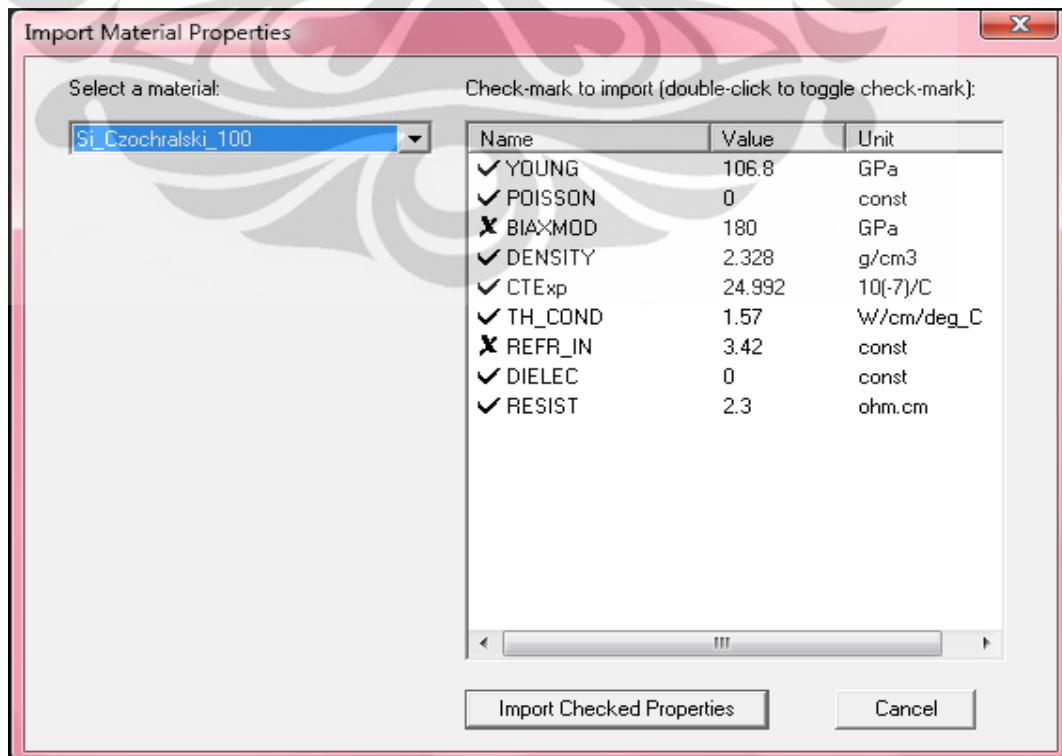
Setelah membuat struktur MEMS sensor spektral molekuler, kita dapat langsung melakukan simulasi dengan terlebih dahulu menyimpan file dalam bentuk "nama_file.save". Ada beberapa macam simulasi yang akan dilakukan untuk mencari hasil simulasi awal sebelum kemudian dilakukan optimasi. Simulasi – simulasi tersebut adalah:

1. *Mechanical analysis* → menentukan nilai natural frequency
2. *Electrostatic analysis* → menentukan efek kapasitansi
3. *Electromechanical analysis* → menentukan displacement
4. *Shagging analysis* → menentukan efek tekanan pada natural frequency

Setelah masuk ke dalam modul, hal yang pertama harus dilakukan adalah membuka nama_file.save, kemudian mengubah property dari design kita secara:

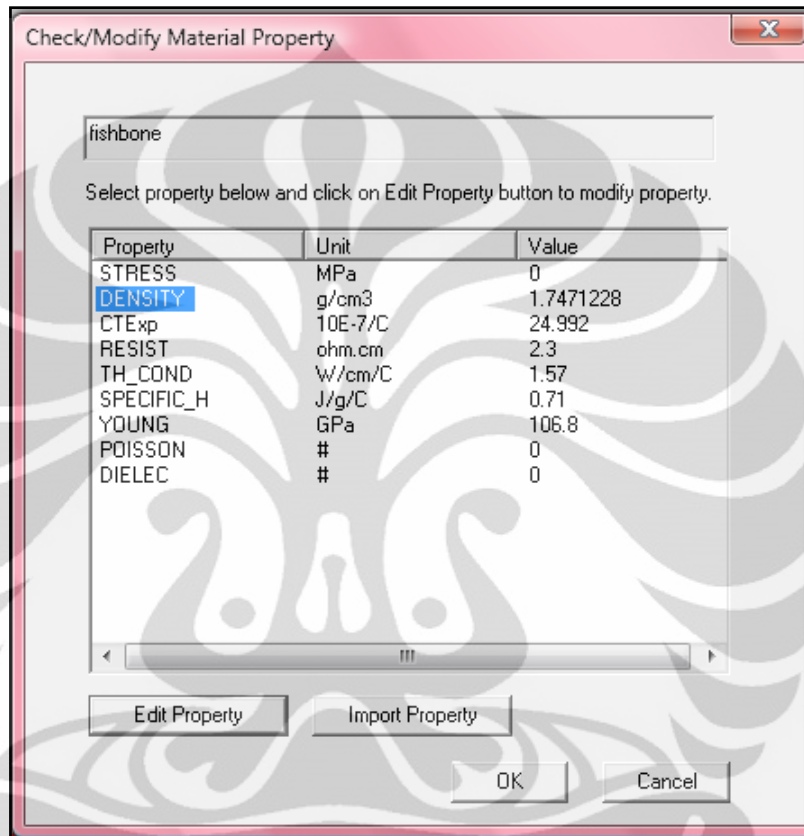
1. *Material...Selection Mode...Pick on Geometry*
2. Melakukan *setting* material

Material...Check/Modify... akan keluar pada command "*Please select entity...*" yang berarti kita memilih *entity design*. Pilih salah satu *entity*. Akan keluar *window*, pilih *Import Property*. Pada *window* itu, kita memilih *Si_Czocharalski_100*, dan *Import Checked Property*



Gambar 3.5 *Import material properties*

Untuk *seismic mass*, kita masih harus perlu memilih *edit property* dengan terlebih dahulu mengarahkan *cursor* pada *DENSITY* dan mengubah nilainya dari $2,328 \text{ kg/m}^3$ menjadi 1.7471228 kg/m^3 , selain itu kita tidak perlu memilih *edit property* dan dapat langsung siap untuk memulai simulasi dengan memilih **OK**



Gambar 3.6 *Editing material properties*

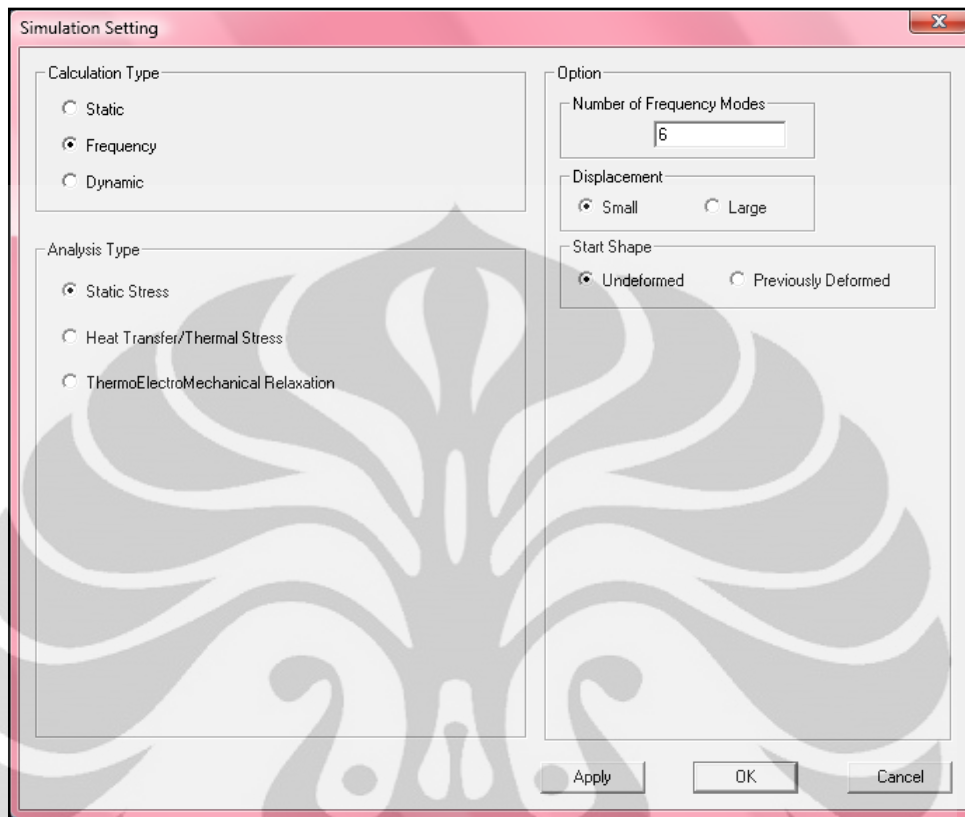
3.3.1 *Mechanical Analysis*

Setelah membuat nama_file.save, kita akan dapat memulai simulasi dengan menggunakan modul *ThermoElectroMechanical* (TEM). Dalam modu ini terdapat 3 macam simulasi yang dapat dipilih, antara lain *static*, *frequency* dan *dynamic*. Untuk *mechanical analysis* yang bertujuan menganalisa besarnya *natural frequency*, maka kita akan memilih

1. Membuka *original design*
Mesh...Load Original Mesh...
2. *Setting* parameter material / *entity* yang akan disimulasikan

3. Setting simulasi

Simulation...Simulation Setting...



Gambar 3.7 Mechanical analysis simulation setting

4. Memasukkan *boundary condition*

Boundary...Selection Mode...Pick On Geometry...

Boundary...Fixed...

Akan keluar pada *command* "***Please select entity...***" yang berarti kita memilih *entity design*. Pilih seluruh *entity* yang berwarna ungu pada bagian permukaan. Setelah dipilih *entity* akan berwarna merah, dan akan keluar *window*. Jika benar Akan keluar *window*, pilih "***Applying boundary condition***" **OK** jika benar, **Cancel** jika salah.

5. Verifikasi *boundary condition*

Boundary...Selection Mode...Check Only...

Boundary...Fixed...

6. Memasukkan *load*

Load diasumsikan tidak ada oleh karena itu tidak perlu diinput

7. *Analysis*

Analysis...Start Frequency Analysis...

8. Result

Result...Natural Frequency...

Analisa ini akan membantu kita untuk melihat berapa besarnya *frequency natural* dari design yang telah kita buat. Hasil yang diinginkan adalah 90kHz

3.3.2 Electrostatic Analysis

Setelah membuat nama_file.save, kita akan dapat memulai simulasi dengan menggunakan modul *ThermoElectroMechanical* (TEM). Dalam modul ini terdapat 3 macam simulasi yang dapat dipilih, antara lain *static*, *frequency* dan *dynamic*. Untuk *electrostatic analysis* yang bertujuan menganalisa besarnya efek kapasitansi, maka yang harus kita lakukan

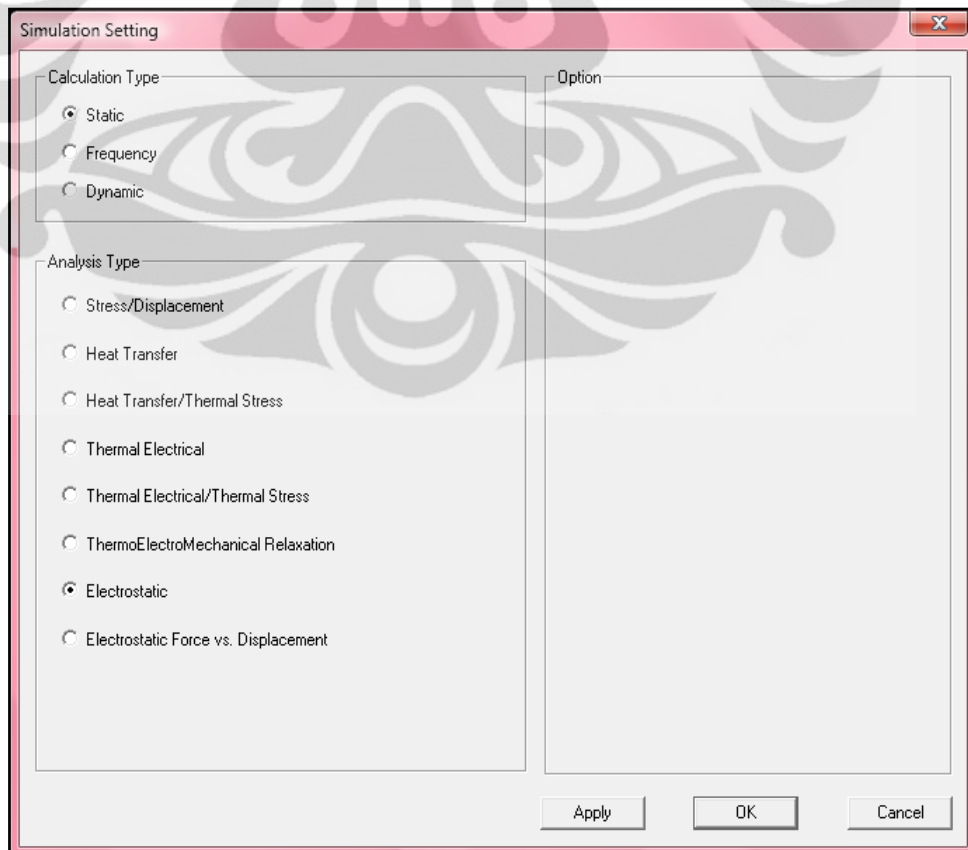
1. Membuka *original design*

Mesh...Load Original Mesh...

2. *Setting* parameter material / *entity* yang akan disimulasikan

3. *Setting* simulasi

Simulation...Simulation Setting...



Gambar 3.8 Electrostatic analysis simulation setting

4. Memasukkan *boundaries*

Boundaries diasumsikan *fixed*, oleh karena itu tidak perlu diinput

5. Memasukkan *loads*

Loads...Selection Mode...Pick on Geometry...

Loads...Voltage...Entity...

Ketik 20 untuk bagian lain yang tidak *fixed* (warna selain ungu), untuk *fixed part / anchor* yang ditandai dengan warna ungu, ketik 0. (pastikan keadaan).

6. Verifikasi *load*

Loads...Selection Mode... Check Only...

Loads...Voltage...Entity...

7. *Analysis*

Analysis...Start Static Analysis...

Analisa ini akan membantu kita untuk melihat berapa besarnya efek kapasitansi dari design yang telah kita buat.

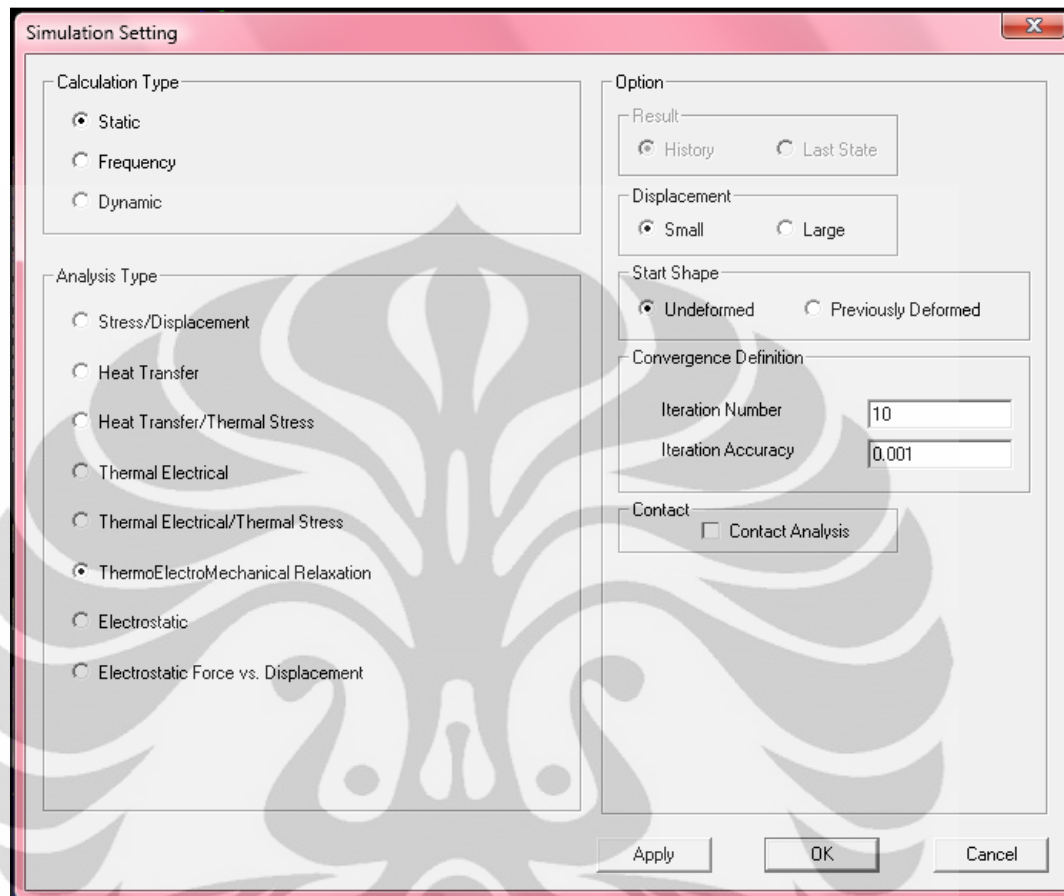
3.3.3 Electromechanical Analysis

Untuk *electromechanical analysis* yang bertujuan menganalisa besarnya *displacement* yang terjadi pada design yang telah kita buat, maka yang harus kita lakukan

1. Buka 3D builder kembali, ubah warna *fingers* menjadi biru muda, begitu pula dengan warna *spring*. Saat ini design hanya memiliki dua buah warna (semakin sedikit warna, maka akan semakin cepat routing hasil, dan hasil yang diperoleh lebih akurat). Simulasi ini tidak memperhatikan massa jenis. Oleh karena itu tidak apa-apa dilakukan perubahan semacam ini. Simpan file ini nama *_file.save*
2. Kita dapat memulai simulasi kembali dengan menggunakan TEM
3. *Setting* parameter material / *entity* yang akan disimulasikan

4. Setting simulasi

Simulation...Simulation Setting...



Gambar 3.9 Electromechanical analysis simulation setting

Semakin besar *iteration number*, maka hasil yang diperoleh akan semakin spesifik teliti. Hanya saja, akan diperlukan waktu *routing* yang lebih lama. Untuk langkah awal, lebih baik jika *iteration number* kurang dari 5.

5. Memasukkan *loads*

Loads...Selection Mode...Pick on Geometry...

Loads...Voltage...Entity...

Ketik 20 untuk bagian lain yang tidak fixed (biru muda), untuk *fixed part* / *anchor* yang ditandai dengan warna ungu, ketik 0.

6. Verifikasi *loads*

Loads...Selection Mode... Check Only...

Loads...Voltage...Entitiy

8. *Analysis*

Analysis...Start Static Analysis...

3.3.4 *Shagging Analysis*

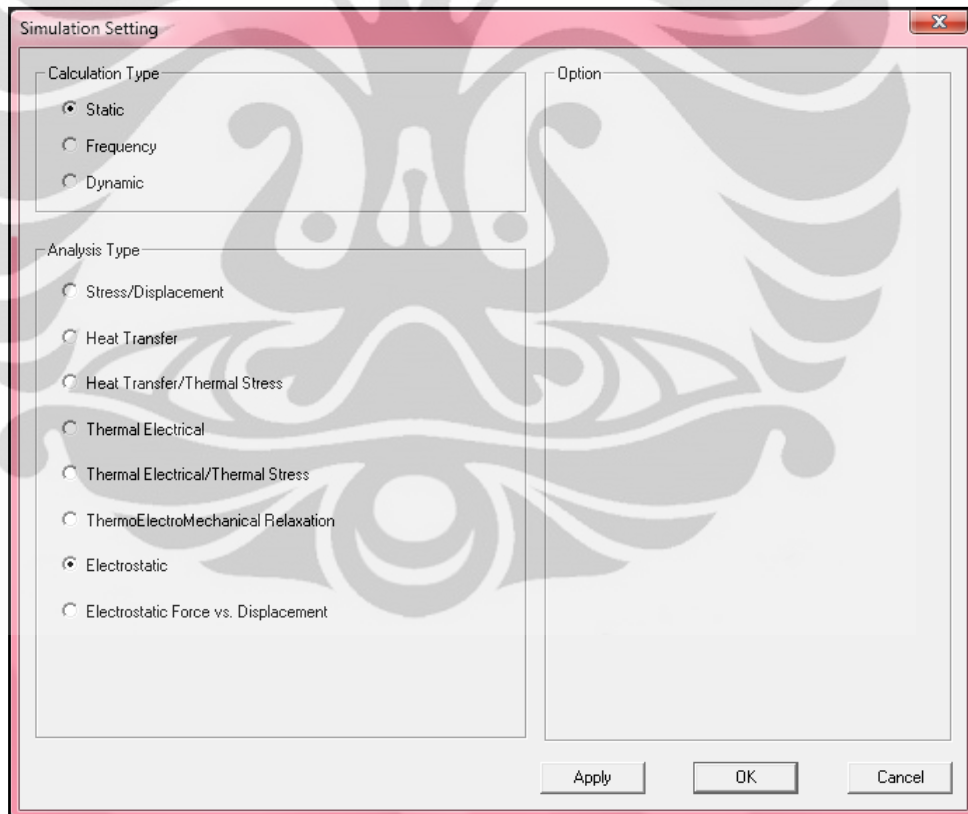
Setelah membuat nama_file.save, kita akan dapat memulai simulasi dengan menggunakan modul *ThermoElectroMechanical* (TEM). Dalam modul ini terdapat 3 macam simulasi yang dapat dipilih, antara lain *static*, *frequency* dan *dynamic*. Untuk *shagging analysis* yang bertujuan menganalisa besarnya efek tekanan massa pada *spring* dan struktur design keseluruhan, maka yang harus kita lakukan

1. Membuka *original design*

Mesh...Load Original Mesh...

2. *Setting* parameter material / *entity* yang akan disimulasikan
3. *Setting* simulasi

Simulation...Simulation Setting...



Gambar 3.10 *Shagging analysis simulation setting*

4. Memasukkan *boundaries*

Boundaries diasumsikan *fixed*, oleh karena itu tidak perlu diinput

5. Memasukkan *loads*

Loads...Selection Mode...Pick on Geometry...

Loads...Pressure...Face...

Ketik besarnya *pressure* dibagian yang berwarna biru muda. Besarnya *pressure* ditentukan dengan cara:

- Menghitung jumlah luas permukaan *seismic mass* dan *fingers* (10 pasang)
- Kalikan hasil tersebut dengan ketebalan design yaitu 40 μm dan nilai dari *density* yang telah dimodifikasi (1747,1227 kg/m^3)
- Hasil yang diperoleh dalam Pa. Oleh karena itu, jangan lupa ketika diketikkan dalam window dikalikan e^{-6}

6. Verifikasi *load*

Loads...Selection Mode... Check Only...

Loads...Pressure...Face...

7. *Analysis*

Analysis...Start Static Analysis...

Analisa ini akan membantu kita untuk melihat berapa besarnya efek tekanan massa pada *spring*. Hal ini perlu dilakukan untuk mencegah *spring* mengalami tekanan yang berlebih

3.4 OPTIMASIMASI PEMODELAN

Dalam design MEMS sensor dielektrometrik spektral molekuler ini, ada beberapa syarat yang diwajibkan untuk dipenuhi oleh penulis. Syarat-syarat tersebut dijadikan *boundary*, sehingga tidak dapat dirubah. Penulis hanya dapat melakukan optimasi dengan cara mengubah parameter lain selain parameter yang telah dijadikan *boundary* sejak awal. Parameter-parameter *boundary* tersebut adalah

1. *Proofmass* tepatnya *Seismic mass* harus memiliki lebar 500 μm
2. *Proofmass* dan berbentuk *fishbone*
3. *Proofmass* memiliki konstruksi menyerupai papan catur, hanya pada bagian sisinya, tidak memiliki lubang.
4. Panjang *fingers* harus berukuran 250 μm x 4 μm x 40 μm

5. *Cantilever* yang dipergunakan harus memiliki panjang minimal 250 μm
6. Ukuran divais keseluruhan 1000 μm x 1000 μm x 40 μm
7. Ukuran lubang, minimal 4 μm x 4 μm x 40 μm
8. Letak *anchor fixed*
9. Hanya diperbolehkan menggunakan 2 STFB, sedangkan *cantilever* tidak dibatasi
10. Spring mengikuti kaidah *Straight Truss Folded Beam (STFB)*

Untuk memperoleh *natural frequency* yang diinginkan, 90kHz, ada beberapa hal yang dapat kita lakukan. Berdasarkan rumus-rumus dan teori-teori dasar yang telah diungkapkan pada bab-bab sebelumnya, yang dapat kita lakukan untuk mengoptimasi design dibagi menjadi tiga bagian besar menurut letak pengoptimasian dilakukan:

1. Optimasi *proofmass (seismic mass)*
2. Optimasi *fingers*
3. Optimasi *tether*

Ketiga optimasi tersebut memiliki dua pengaruh, yaitu pada *optimasi massa* dan *optimasi constant spring*. Pada bagian berikut, hanya akan dibahas salah satu optimasi yang dominan akibat optimasi yang dilakukan pada *proofmass*, *fingers* maupun *tether*. Untuk suatu optimasi yang dilakukan pada titik-titik tertentu pada seperti *proofmass*, *fingers* dan *tether*, efek-efek optimasi akan dapat dilihat pada peningkatan maupun penurunan *natural frequency*.

3.4.1 Optimasi *Proofmass (Seismic mass)*

Untuk memperoleh *natural frequency* yang diinginkan, 90kHz, ada beberapa hal yang dapat kita lakukan. Berdasarkan rumus-rumus dan teori-teori dasar yang telah diungkapkan pada bab-bab sebelumnya, yang dapat kita lakukan antara lain adalah mengoptimasi *proofmass*, tepatnya *seismic mass*, dengan cara:

1. Mengubah panjang *proofmass*

Berdasarkan teori yang telah dipelajari, dengan memberikan variasi pada panjang *proofmass*, maka nilai massa akan mengalami perubahan. Apabila panjang *proofmass* semakin besar, maka akan mengakibatkan massa bertambah. Dengan penambahan massa, maka *natural frequency* akan

semakin berkurang. Apabila rancang design penulis ternyata menghasilkan *natural frequency* dibawah 90kHz, maka *natural frequency* dapat ditingkatkan dengan cara mengurangi massa *proofmass* (mengurangi panjang *seismic mass*). Sedangkan apabila rancang design penulis ternyata menghasilkan *natural frequency* diatas 90Khz, maka *natural frequency* ditingkatkan dengan cara menambah *massa proofmass* (menambah panjang *seismic mass*)

2. Mengubah bentuk *seismic mass*

Berdasarkan teori yang telah dipelajari, dengan memberikan variasi pada bentuk pada *seismic mass*, akan mengakibatkan perubahan luas permukaan yang signifikan, semakin besar luas permukaan *seismic mass*, maka akan semakin besar pula volume divais. Divais dengan volume yang besar memiliki massa yang lebih besar. Akibat dari massa yang besar adalah semakin berkurangnya *natural frequency*. Apabila dari hasil simulasi diperoleh *natural frequency* yang lebih rendah dari 90kHz, maka hal yang dilakukan adalah mengurangi massa, sedangkan apabila diperoleh *natural frequency* yang lebih besar, maka yang harus dilakukan adalah penurunan massa, agar dapat menurunkan *natural frequency* menjadi 90kHz

3. Mengubah bentuk dan ukuran lubang

Mengubah bentuk lubang dapat dilakukan, hanya saja harus mengingat syarat yang berlaku. Syarat ini perlu untuk kemudahan pada saat fabrikasi, agar tidak terjadi kesalahan dan kerusakan. Bentuk lubang secara keseluruhan merupakan hasil penyusunan lubang-lubang kecil berukuran $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$. Massa jenis substitusi yang dipergunakan, berasal dari modifikasi massa jenis awal silicon yang bernilai 2328kg/m^3 menjadi $1747,1288\text{kg/m}^3$. Hal ini dikarenakan untuk design awal, penulis mengasumsikan rancang design memiliki lubang sebesar $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$. Apabila lubang yang dipergunakan semakin besar, maka massa yang diperoleh dalam keadaan sebenarnya akan semakin kecil. Hal ini berakibat pada semakin besarnya nilai massa jenis pengganti. Sedangkan jika lubang yang dipergunakan semakin kecil, maka massa yang diperoleh dalam keadaan sebenarnya akan semakin kecil pula. Hal ini mengakibatkan

semakin kecilnya massa jenis pengganti. Jadi dapat disimpulkan besarnya lubang berbanding lurus dengan massa jenis / *density* pengganti. Semakin besar dimensi lubang, semakin besar volume lubang (volume benda akan semakin kecil) maka massa jenis pengganti akan semakin besar.

3.4.2 Optimasi *Fingers*

Untuk memperoleh *natural frequency* yang diinginkan, 90kHz, ada beberapa hal yang dapat kita lakukan. Berdasarkan rumus-rumus dan teori-teori dasar yang telah diungkapkan pada bab-bab sebelumnya, yang dapat kita lakukan antara lain mengoptimasi *fingers*. Hal yang perlu diperhatikan adalah ukuran *fingers* yang tidak boleh diubah (*fingers* harus berukuran $250\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$) Optimasi *fingers* sangat mempengaruhi efek kapasitansi dari divais secara keseluruhan. Optimasi *fingers* yang mungkin dilakukan antara lain:

1. Mengubah jarak antar *fingers*

Dengan mengubah jarak antar *fingers*, sangat mempengaruhi nilai *natural frequency* secara keseluruhan. Penambahan jarak secara tidak langsung berakibat terhadap penambahan massa divais secara keseluruhan. Modifikasi jarak antar *fingers* dapat dibedakan menjadi 2 : menambahkan jarak antar *fingers* maupun mengurangi jarak antar *fingers*. Apabila jarak antar *fingers* dikurangi, maka *natural frequency* yang diperoleh akan semakin kecil, hal ini berbanding lurus dengan nilai kapasitansi yang semakin berkurang. Apabila jarak antar *fingers* ditambah, maka *natural frequency* yang diperoleh akan semakin besar, demikian pula efek kapasitansi yang ditimbulkan oleh divais tersebut.

2. Mengubah jumlah pasangan *fingers*

Mengubah jumlah pasangan *fingers* akan mempengaruhi massa divais secara keseluruhan. Semakin banyak pasangan *fingers* yang dipergunakan, maka akan menyebabkan penambahan massa divais secara keseluruhan. Penambahan massa ini akan menyebabkan penurunan *natural frequency* yang dihasilkan. Sebaliknya, apabila jumlah pasangan *fingers* yang dipergunakan semakin sedikit, maka *natural frequency* yang diperoleh akan meningkat.

3.4.3 Optimasi *Tether*

Untuk memperoleh *natural frequency* yang diinginkan, 90kHz, ada beberapa hal yang dapat kita lakukan. Berdasarkan rumus-rumus dan teori-teori dasar yang telah diungkapkan pada bab-bab sebelumnya, yang dapat kita lakukan antara lain mengoptimasi *spring*. Hal yang perlu diperhatikan adalah hanya boleh ada 2 STFB (4 *truss tether* dan 8 *beam tether*) dan ukuran minimal *cantilever* adalah $250 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$. optimasi *spring* sangat besarnya *natural frequency*. Bukan berarti ketika optimasi dilakukan di *tether*, tidak melakukan optimasi massa. Hanya saja efek dari optimasi massa jauh lebih kecil daripada efek dari optimasi *spring*. Oleh karena itu, pada bagian ini, yang akan dibahas adalah optimasi *tether* yang berkaitan dengan optimasi *spring*. Optimasi *tether* yang mungkin dilakukan antara lain:

1. Mengubah ukuran *Beam Tether*

Semakin panjang *beam tether*, maka akan mengakibatkan peningkatan massa. Apabila dilakukan peningkatan massa dengan cara ini, maka akan sangat berpengaruh pula pada *spring constant*. *Spring constant* dapat menurun tajam, sehingga akan mengakibatkan *natural frequency* berkurang jauh. Sebaliknya, apabila panjang *beam tether* dikurangi, maka massanya akan berkurang. Hal ini tidak terlalu berpengaruh pada massa secara keseluruhan, melainkan sangat berpengaruh pada nilai *natural frequency* yang akan melonjak tinggi. Semakin lebar *beam tether*, maka akan mengakibatkan peningkatan massa. Apabila peningkatan massa dilakukan dengan cara ini, maka akan sangat berpengaruh pada *spring constant*. *Spring constant* akan meningkat. Sehingga mengakibatkan naiknya *natural frequency*. Dapat disimpulkan, semakin panjang dan tipis *beam tether* akan menyebabkan nilai *natural frequency* berkurang karena nilai *spring constant* menurun. Sedangkan semakin pendek dan tebal *beam tether*, akan menyebabkan nilai *natural frequency* bertambah nilai *spring constant* meningkat.

2. Mengubah jumlah *Cantilever*

Apabila jumlah *cantilever* diubah, maka akan berpengaruh pada peningkatan massa divais. Semakin banyak *cantilever*, maka massa divais akan meningkat. Semakin sedikit *cantilever* yang dipergunakan, maka massa divais akan berkurang. Hanya saja, penambahan jumlah *cantilever* sangat berpengaruh pada nilai *constant spring*. *Cantilever* menyebabkan *constant spring* tidak stabil pada frequency menengah keatas. Pada umumnya, semakin banyak *cantilever* yang dipergunakan, maka *constant spring* akan meningkat, sebanding dengan peningkatan massa divais keseluruhan. Semakin banyak *cantilever*, maka nilai *natural frequency* akan semakin bertambah. Apabila hanya sedikit *cantilever* yang dipergunakan, maka *natural frequency* akan berkurang.

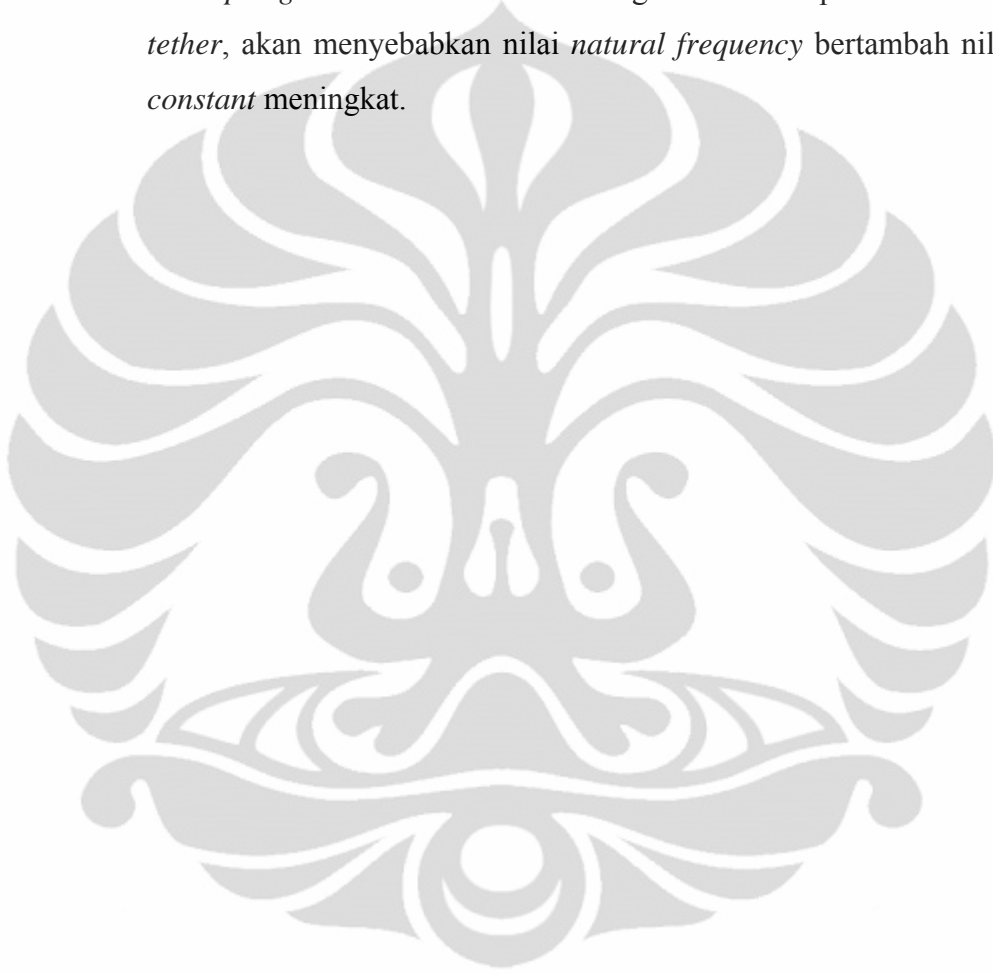
3. Mengubah ukuran *Cantilever*

Hal yang perlu diperhatikan sebelum mengubah ukuran *cantilever* adalah *cantilever* harus memiliki panjang minimal 250 μ m. Hal ini sudah ditetapkan sejak awal. Apabila *cantilever* yang dipergunakan semakin panjang, maka massa divais akan semakin bertambah bersamaan dengan nilai *constant spring* yang semakin tidak stabil. Semakin lebar *cantilever* yang dipergunakan, massa divais akan semakin bertambah pula. Tetapi hal ini tidak terlalu berpengaruh pada *constant spring*. Semakin panjang *cantilever*, maka *natural frequency* yang dihasilkan akan semakin rendah, apabila *cantilever* dikurangi panjangnya (panjang minimal 250 μ m) maka *natural frequency* akan bertambah.

4. Mengubah ukuran *Truss Tether*

Semakin panjang *truss tether*, maka akan mengakibatkan peningkatan massa. Apabila dilakukan peningkatan massa dengan cara ini, maka akan sangat berpengaruh pula pada *spring constant*. *Spring constant* dapat menurun tajam, sehingga akan mengakibatkan *natural frequency* berkurang jauh. Sebaliknya, apabila panjang *truss tether* dikurangi, maka massanya akan berkurang. Hal ini tidak terlalu berpengaruh pada massa secara keseluruhan, melainkan sangat berpengaruh pada nilai *natural frequency* yang akan melonjak tinggi. Semakin lebar *truss tether*, maka

akan mengakibatkan peningkatan massa. Apabila peningkatan massa dilakukan dengan cara ini, maka akan sangat berpengaruh pada *spring constant*. *Spring constant* akan meningkat. Sehingga mengakibatkan naiknya *natural frequency*. Dapat disimpulkan, semakin panjang dan tipis *truss tether* akan menyebabkan nilai *natural frequency* berkurang karena nilai *spring constant* menurun. Sedangkan semakin pendek dan tebal *truss tether*, akan menyebabkan nilai *natural frequency* bertambah nilai *spring constant* meningkat.



BAB IV

SIMULASI DAN ANALISA OPTIMASI

4.1 METODOLOGI PENELITIAN

Tugas akhir yang menjadi materi penelitian penulis adalah perancangan, simulasi dan optimasi sensor spektral molekuler. 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*.

Penelitian yang dilakukan oleh penulis berdasarkan alur tertentu. Langkah inisiasi yang perlu dilakukan adalah memahami dasar-dasar teori yang diperlukan. Dengan berpedoman pada teori yang telah dikuasai, penulis mencoba membuat suatu design dengan terlebih dahulu mendefinisikan dan menerapkan *boundaries* sebagai berikut:

1. *Proofmass* tepatnya *Seismic mass* harus memiliki lebar 500 μm
2. *Proofmass* dan berbentuk *fishbone*
3. *Proofmass* memiliki konstruksi menyerupai papan catur, hanya pada bagian sisinya, tidak memiliki lubang.
4. Panjang *fingers* harus berukuran 250 μm x 4 μm x 40 μm
5. Cantilever yang dipergunakan harus memiliki panjang konstan 250 μm
6. Ukuran divais keseluruhan 1000 μm x 1000 μm x 40 μm
7. Ukuran lubang, minimal 4 μm x 4 μm x 40 μm
8. Letak *anchor fixed*
9. Spring mengikuti kaidah *Straight Truss Folded Beam* (STFB), hanya diperbolehkan menggunakan 2 STFB, sedangkan *cantilever* tidak dibatasi

Setelah menerapkan *boundaries* dan membuat design, design diserahkan kepada pembimbing untuk dilihat dan diperiksa. Apabila design sudah disetujui, maka simulasi dapat mulai dilakukan. Karena keterbatasan waktu yang diberikan, maka penulis memutuskan untuk memfokuskan diri pada simulasi untuk mengetahui bagaimana perubahan frekuensi mekanis dari MEMS elektroda apabila dikenakan perlakuan berupa perubahan tebal, panjang dan letak *spring*.

Simulasi yang harus dilakukan adalah *mechanical analysis* menggunakan modul TEM (*Thermo Electro Mechanical*) analysis. *Mechanical analysis* ini bertujuan menentukan besarnya *natural frequency* dari design yang telah dirancang.

4.2 HIPOTESIS

Ada beberapa hipotesis yang diasumsikan oleh penulis dalam penulisan seminar ini. Hipotesis ini akan dibuktikan pada simulasi dan optimasi yang akan dibahas pada tugas akhir. Hipotesis ini dibagi menjadi 3 bagian besar, yaitu hipotesis pada *proofmass*, hipotesis pada *finger* dan hipotesis pada *spring*.

1. H1 (Variasi pada *proofmass*)

H1a : Variasi pada ukuran *proofmass* (*seismic mass*) akan mempengaruhi (meningkatkan maupun mengurangi) *frequency natural* divais keseluruhan

H1b : Variasi pada ukuran lubang pada *proofmass* (*seismic mass*) akan mempengaruhi (meningkatkan maupun mengurangi) *frequency natural* divais keseluruhan.

2. H2 (Variasi pada *finger*)

H2a : Variasi pada jarak antar *finger* akan mempengaruhi (meningkatkan maupun mengurangi) *frequency natural* divais keseluruhan

H2b : Variasi pada jumlah pasangan *finger* akan mempengaruhi (meningkatkan maupun mengurangi) *frequency natural* divais keseluruhan

3. H3 (Variasi pada *spring*)

H3a : Variasi pada ukuran *cantilever* akan mempengaruhi (meningkatkan maupun mengurangi) *frequency natural* divais keseluruhan

H3b : Variasi pada jumlah *cantilever* akan mempengaruhi (meningkatkan maupun mengurangi) *frequency natural* divais keseluruhan

- H3c : Variasi pada ukuran *beam tether* akan mempengaruhi (meningkatkan maupun mengurangi) *frequency natural* divais keseluruhan
- H3d : Variasi pada ukuran *truss tether* akan mempengaruhi (meningkatkan maupun mengurangi) *frequency natural* divais keseluruhan

Penulis tidak akan bosan untuk mengingatkan bahwa karena dengan keterbatasan waktu pengumpulan yang ada (tanggal pengumpulan yang dipercepat), maka penulis tidak dapat melakukan cukup simulasi untuk membuktikan hipotesis yang ada. Skripsi ini difokuskan untuk membuktikan Hipotesis3 saja (H3).

Hipotesis H1 mengenai variasi pada *proofmass*, dibuktikan secara tidak langsung karena dengan melakukan perubahan variasi bentuk, maka akan terjadi perubahan massa pada design yang telah dibuat oleh penulis. Hipotesis H1a akan tampak pada simulasi, pengolahan data dan analisa yang akan dilakukan. Sedangkan Hipotesis H1b tidak dapat dilakukan secara langsung karena keterbatasan pada lamanya waktu simulasi yang dibutuhkan apabila design untuk simulasi dibuat dengan lubang-lubang. Namun, kita dapat menyimpulkan sendiri, apabila ukuran design selalu konstan, namun lubang yang ada berjumlah semakin banyak, maka akan menyebabkan massa design semakin ringan. Massa design yang semakin ringan, akan menyebabkan nilai dari massa jenis design (nilai yang disubstitusikan untuk mempermudah simulasi) menjadi semakin kecil. Apabila massa design semakin ringan, maka frekuensi natural yang dihasilkan akan semakin besar. Untuk variasi bentuk lubang, akan sangat sulit dilakukan karena adanya keterbatasan waktu dan keterbatasan dari program yang dipergunakan untuk simulasi. Semakin banyak potongan dari design, maka akan memakan waktu yang semakin lama untuk mendapatkan hasil frekuensi natutralnya.

Hipotesis H2 mengenai variasi pada *finger*, tidak dibuktikan oleh penulis karena keterbatasan waktu dan kesempatan yang diberikan untuk pembuatan dan penyusunan skripsi ini.

Hipotesis H3 mengenai variasi pada spring yang dipergunakan akan menjadi fokus dari skripsi ini. Pembahasan mengenai hipotesis ini akan dimulai dari penyajian data mentah dalam bentuk tabel dan grafik, hasil dari pengolahan data yang dilakukan oleh penulis dalam bentuk tabel dan juga grafik, serta analisa mengenai perubahan frekuensi natural akibat dari variasi ukuran dan banyaknya spring yang dipergunakan

4.3 SIMULASI

Penulis mencoba untuk membagi-bagi sedemikian rupa variasi dalam percobaan sehingga lebih mudah untuk diikuti dan dimengerti. Hal ini tentunya juga akan membawa keuntungan bagi penulis, yaitu mempermudah untuk melakukan pengolahan data dan analisa selanjutnya.

Percobaan pertama mengambil asumsi beberapa asumsi. Asumsi yang pertama adalah tidak akan dipergunakan spring tengah atau yang lebih dikenal dengan sebutan *cantilever*. *Cantilever* tidak akan dipergunakan, karena penulis ingin mengetahui, seberapa besar pengaruh ukuran panjang dan lebar dari *truss tether* dan *beam tether* terhadap frekuensi mekanis yang dihasilkan oleh MEMS elektroda. Dari percobaan-percobaan yang sebelumnya telah penulis lakukan, penulis mendapati bahwa sistem akan mencapai nilai saturasi kurang lebih saat frekuensi natural bernilai 90000 Hz atau 90kHz. Percobaan-percobaan tersebut tidak akan diuraikan lebih lanjut, namun kita tetap akan menemukannya dalam percobaan simulasi yang akan dilakukan.

Percobaan pertama dibagi menjadi beberapa bagian berdasarkan lebar *spring* yang akan dipergunakan. Lebar *spring* yang pertama kali akan dicoba sebesar 2 μm , yang kemudian akan ditingkatkan dengan range 2 μm . Lebar *spring* pada akhirnya akan berkisar antara 2 – 12 μm . Selanjutnya, akan ditentukan berapakah panjang dari *truss tether* yang akan dipergunakan. Pada simulasi ini, penulis mengambil nilai *truss tether* berkisar antara 2 – 12 μm juga dengan range 2 μm . Kemudian, langkah terakhir akan dimasukkan pula variasi dari *beam tether* yang akan dipergunakan. Variasi *beam tether* yang akan dipergunakan diambil secara acak oleh penulis, sehingga pada akhirnya *beam tether* akan memiliki panjang berkisar antara 25 μm , 51 μm , 102 μm , 205 μm , dan 410 μm .

Sebagai contoh cara melakukan simulasi adalah sebagai berikut. Tentukan 2 variabel yang akan selalu bernilai tetap. Dalam hal ini, penulis mengasumsikan nilai dari lebar *spring* yang dipergunakan dan panjang dari *truss tether* bernilai konstan. Ketika dipergunakan lebar 2 μm dan panjang trus tether 2 μm , nilai dari *beam tether* divariasikan menjadi 25 μm , 51 μm , 102 μm , 205 μm , dan 410 μm . Untuk setiap kali dilakukan perubahan variasi, catat hasil yang diperoleh. Setelah itu, ganti panjang *truss tether* yang dipergunakan menjadi 4 μm (lebar *spring* tetap 2 μm) lalu masukkan kembali variasi nilai panjang *beam tether* sebesar 25 μm , 51 μm , 102 μm , 205 μm , dan 410 μm . Ulangi percobaan hingga nilai dari *truss tether* mencapai 12 μm . Setelah itu baru ganti nilai dari *truss tether* menjadi 4 μm . Simulasi ini akan dilakukan hingga *truss tether* bernilai 12 μm dan panjang *beam tether* mencapai 410 μm .

Percobaan yang kedua dilakukan dengan cara mengasumsikan terdapat 2 buah *cantilever* pada bagian tengah *body*, lebar *truss tether*, *beam tether* dan *cantilever* sama dengan *stair cantilever spring*. Langkah pertama adalah tentukan variabel yang konstan, yaitu: *beam tether*, *truss tether* selalu bernilai 10 μm (angka ini diambil secara acak karena panjang *truss tether* tidak terlalu berpengaruh terhadap frekuensi natural yang dihasilkan), serta lebar dari *spring* yang dipergunakan harus sama (*cantilever*, *beam tether*, *truss tether*, dan *stair spring tether*). Variabel yang dipergunakan untuk perhitungan variasi adalah jarak dari *body* ke *cantilever*.

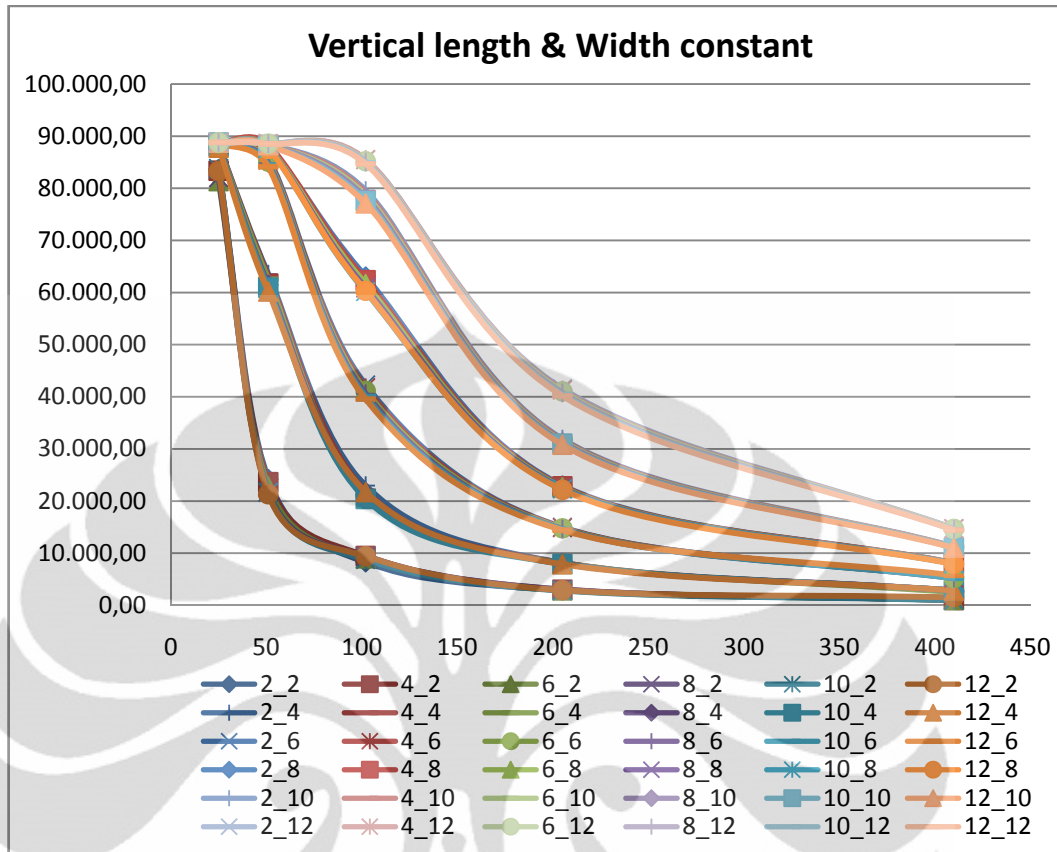
Sebagai contoh, ketika dipergunakan *truss tether* sepanjang 10 μm , dengan lebar *spring* 2 μm dan panjang *beam tether* sebesar 51 μm dan jarak *cantilever* sebesar 10 μm dari *body*, variasikan banyaknya *stair spring* yang terletak diantara kedua buah *cantilever* sebesar 1 – 5 buah dengan jarak konstan 70 μm . Kemudian, naikkan jarak *cantilever* dengan *body* menjadi 20 μm . Kembali variasikan banyaknya *stair spring* yang terletak diantara kedua buah *cantilever* sebanyak 1 -5 buah dengan jarak konstan 70 μm . ulangi terus simulasi ini hingga jarak *cantilever* dengan *body* menjadi 60 mm dan banyaknya *stair spring* adalah 5 buah. Kemudian ubahlah panjang dari *beam tether*. Lakukan kembali percobaan kedua hingga seluruh kemungkinan data dapat diperoleh.

4.4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA

4.4.1 Pengaruh Variasi Dimensi terhadap Perubahan Frekuensi Mekanis

Tabel 4.1a Percobaan 1a – 1f data mentah
(variasi lebar spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap frekuensi natural)

Truss Tether	Beam Tether	fnatural (model)					
		2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00
2	410	1 017,32	2 635,14	5 262,71	8 076,39	11 243,30	14 713,00
	205	2 886,65	8 134,30	14 978,40	22 969,30	31 894,90	41 534,40
	102	8 257,20	22 949,70	42 271,60	63 053,90	79 566,70	85 462,80
	51	24 201,50	63 517,00	85 698,10	87 867,30	88 376,70	88 572,80
	25	83 661,30	88 344,10	88 709,80	88 738,60	88 778,50	88 798,10
4	410	1 012,88	2 660,86	5 243,90	8 115,05	11 207,70	14 668,30
	205	2 982,50	8 105,62	14 874,10	22 820,90	31 702,30	41 298,80
	102	9 478,37	21 875,40	41 725,40	62 378,40	79 142,10	85 499,70
	51	23 632,10	63 143,70	85 428,90	88 269,50	88 334,00	88 562,30
	25	83 364,80	88 355,10	88 623,70	88 703,90	88 774,90	88 796,00
6	410	1 008,79	2 513,96	5 222,40	8 017,43	11 164,80	14 641,10
	205	2 840,21	8 040,27	14 760,20	22 648,90	31 474,90	41 008,70
	102	9 004,39	20 954,10	41 134,50	61 617,80	78 632,40	85 183,20
	51	22 781,20	62 350,90	85 116,50	87 819,70	88 322,70	88 550,70
	25	81 381,30	88 114,60	88 603,00	88 723,50	88 771,30	88 793,90
8	410	1 004,73	2 837,25	5 201,08	7 985,18	11 120,90	14 558,20
	205	2 997,60	7 377,41	14 643,00	22 477,90	31 245,90	40 734,00
	102	9 362,40	21 382,20	40 573,90	60 877,40	78 160,40	85 021,50
	51	21 736,60	61 479,20	84 795,70	87 690,60	88 309,30	88 539,10
	25	82 063,00	88 073,00	88 583,40	88 716,30	88 767,80	88 791,90
1c	410	1 000,73	2 825,77	5 180,04	7 953,02	11 076,60	14 501,30
	205	2 796,96	7 916,52	14 532,10	22 310,20	31 018,70	40 448,60
	102	8 780,57	20 389,70	40 043,60	60 165,30	77 572,60	84 852,40
	51	21 645,20	60 932,80	84 467,30	87 624,70	88 286,10	88 527,50
	25	83 815,20	88 044,00	88 565,00	88 709,40	88 764,50	88 765,50
1f	410	1 553,13	2 814,48	5 758,13	7 921,31	11 032,70	14 444,50
	205	2 897,90	7 857,58	14 424,70	22 147,40	30 796,50	40 167,60
	102	9 383,80	21 701,70	39 543,00	60 318,50	77 075,40	84 679,60
	51	21 288,30	60 183,20	84 133,50	87 564,00	88 263,20	88 516,20
	25	83 313,60	87 789,30	88 535,70	88 703,00	88 761,40	88 788,30



Grafik 4.1a Percobaan 1a – 1f data mentah
(variasi lebar spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap frekuensi natural)

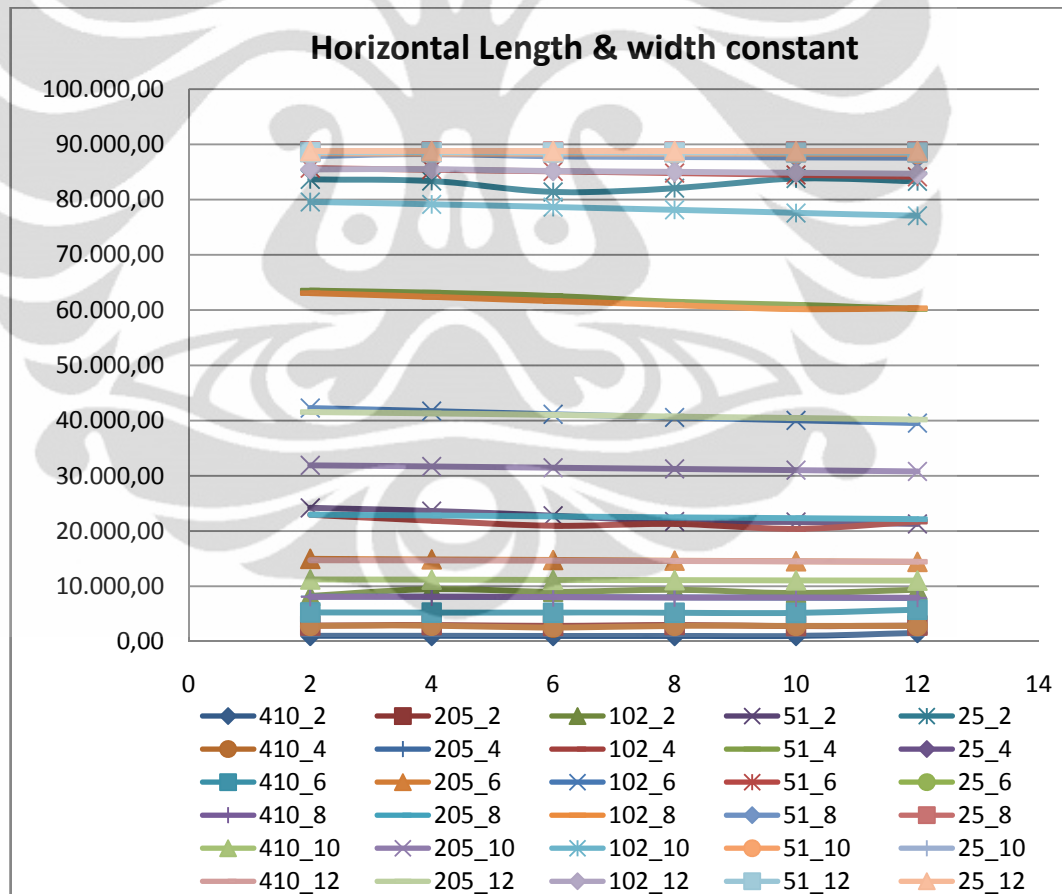
Dari rangkaian percobaan awal (tanpa pengolahan data terlebih dahulu, hanya mempergunakan data asli yang disusun dalam bentuk tabel) mengenai variasi panjang, lebar dan ukuran spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap frekuensi natural, kita dapat menyimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Frekuensi natural berbanding lurus dengan ketebalan spring yang dipergunakan. Semakin lebar spring yang dipergunakan, maka frekuensi yang dihasilkan akan semakin besar. Sedangkan semakin sempit lebar spring yang dipergunakan, maka frekuensi yang dihasilkan akan semakin kecil pula. Hal ini dapat kita temukan apabila kita mengkondisikan *truss tether* dan *beam tether* memiliki ukuran panjang yang konstan.
2. Frekuensi natural berbanding terbalik dengan panjang *beam tether*. Semakin panjang *beam tether* yang dipergunakan, maka frekuensi yang dihasilkan akan semakin kecil. Sedangkan semakin pendek *beam tether* yang dipergunakan, maka frekuensi yang dihasilkan akan semakin

membesar. Hal ini dapat kita temukan apabila kita mengkondisikan lebar spring dan panjang truss tether yang dipergunakan bernilai konstan.

3. Frekuensi natural tidak dipengaruhi oleh panjang truss tether. Walau truss tether diperpendek ataupun diperpanjang, frekuensi natural yang dihasilkan relatif menghasilkan nilai yang sama. Hal ini dapat kita temukan apabila kita mengkondisikan panjang beam tether dan lebar spring yang dipergunakan bernilai konstan.

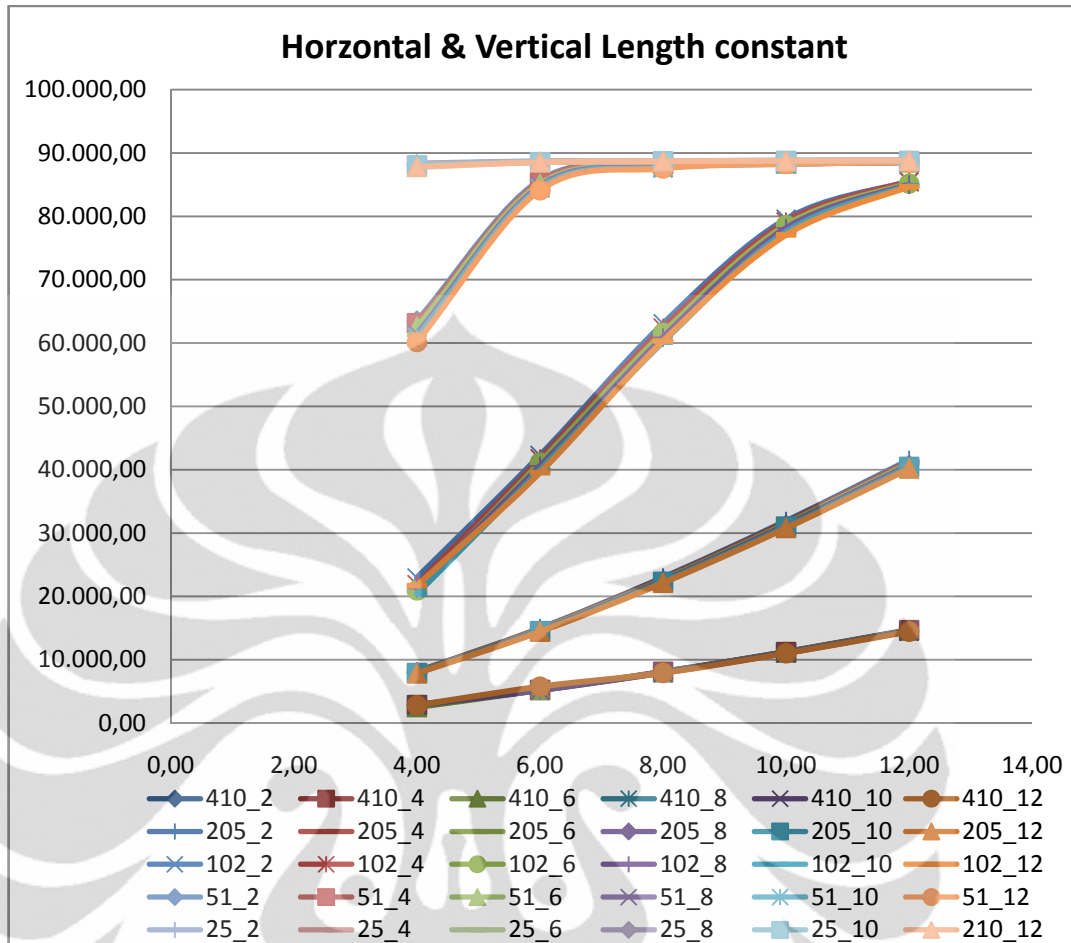
Cara pembacaan grafik, beserta detail percobaan dan grafik masing-masing data percobaan dilampirkan dalam lampiran. Data dan grafik yang ditampilkan untuk analisa sudah merupakan hasil penggabungan data mentah awal dan pengolahan data akhir.



Grafik 4.1b Pengolahan Data Percobaan 1a – 1f
(variasi lebar spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap frekuensi natural)

Tabel 4.1b Percobaan 1a – 1f data olah
 (variasi lebar spring, *truss tether* dan *beam tethe* terhadap frekuensi natural)

Beam Tether	Truss Tether	fnatural (model1)					
		2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00
410 (-250)	2	1.017,32	2.835,14	5.262,71	8.076,39	11.243,30	14.713,00
	4	1.012,88	2.860,86	5.243,90	8.115,05	11.207,70	14.668,30
	6	1.008,79	2.513,96	5.222,40	8.017,43	11.164,80	14.641,10
	8	1.004,73	2.837,25	5.201,08	7.985,18	11.120,90	14.558,20
	10	1.000,73	2.825,77	5.180,04	7.953,02	11.076,60	14.501,30
	12	1.553,13	2.814,48	5.758,13	7.921,31	11.032,70	14.444,50
205 (-45)	2	2.886,65	8.134,30	14.978,40	22.969,30	31.894,90	41.534,40
	4	2.982,50	8.105,62	14.874,10	22.820,90	31.702,30	41.298,80
	6	2.840,21	8.040,27	14.760,20	22.648,90	31.474,90	41.018,70
	8	2.997,60	7.977,41	14.643,00	22.477,90	31.245,90	40.734,00
	10	2.796,96	7.916,52	14.532,10	22.310,20	31.018,70	40.448,60
	12	2.897,90	7.857,58	14.424,70	22.147,40	30.796,50	40.167,60
102 (58)	2	8.257,20	22.949,70	42.271,60	63.053,90	79.568,70	85.462,80
	4	9.478,37	21.875,40	41.725,40	62.378,40	79.142,10	85.499,70
	6	9.004,39	20.954,10	41.134,50	61.617,80	78.632,40	85.183,20
	8	9.362,40	21.282,20	40.573,90	60.877,40	78.160,40	85.021,50
	10	8.780,57	20.389,70	40.043,60	60.165,30	77.572,60	84.852,40
	12	9.388,80	21.701,70	39.543,00	60.318,50	77.075,40	84.679,60
51 (109)	2	24.201,50	63.517,00	85.698,10	87.867,30	88.376,70	88.572,80
	4	23.632,10	63.143,70	85.428,90	88.269,50	88.394,00	88.562,30
	6	22.781,20	62.550,90	85.116,50	87.819,70	88.322,70	88.550,70
	8	21.736,60	61.479,20	84.795,70	87.690,60	88.309,30	88.539,10
	10	21.645,20	60.932,80	84.467,30	87.624,70	88.286,10	88.527,50
	12	21.288,30	60.183,20	84.133,50	87.564,00	88.263,20	88.516,20
25 (135)	2	83.661,30	88.344,10	88.709,80	88.738,60	88.778,50	88.798,10
	4	83.364,80	88.255,10	88.623,70	88.703,90	88.774,90	88.796,00
	6	81.381,30	88.114,60	88.603,00	88.723,50	88.771,30	88.793,90
	8	82.063,00	88.073,00	88.583,40	88.716,30	88.767,80	88.791,90
	10	83.815,20	88.044,00	88.565,00	88.709,40	88.764,50	88.765,50
	12	83.313,60	87.789,30	88.535,70	88.703,00	88.761,40	88.788,30



Grafik 4.1c Pengolahan Data Percobaan 1a – 1f
(variasi lebar spring, truss tether dan beam tether terhadap frekuensi natural)

Dari rangkaian percobaan variasi panjang, lebar dan ukuran spring, truss tether dan beam tether terhadap frekuensi natural, kita dapat menyimpulkan:

1. Frekuensi natural berbanding lurus dengan lebar spring yang dipergunakan apabila kita mengkondisikan panjang truss tether dan beam tether konstan. Semakin lebar spring yang dipergunakan, maka frekuensi natural yang dihasilkan akan semakin besar. Kenaikan frekuensi natural tidak berlangsung secara linear.
2. Frekuensi natural tidak dipengaruhi oleh panjang truss tether. Hal ini dapat kita temukan apabila kita mengkondisikan panjang beam tether dan lebar spring yang dipergunakan bernilai konstan. Frekuensi natural yang dihasilkan tidak akan mempunyai perubahan nilai yang berarti. Sehingga, kita dapat menganggap tidak ada perubahan yang terjadi

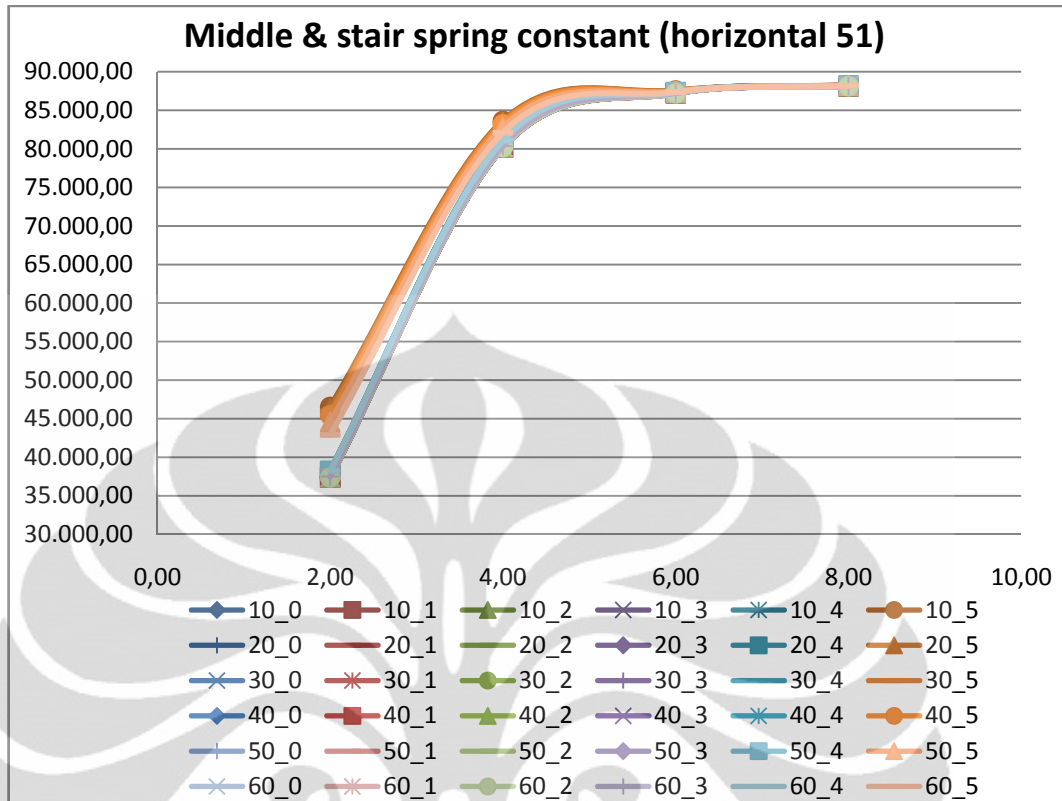
3. Frekuensi natural berbanding terbalik dengan panjang beam tether. Apabila beam tether yang dipergunakan semakin panjang, maka frekuensi natural yang dihasilkan akan semakin rendah. Apabila beam tether kecil, maka frekuensi natural yang dihasilkan akan jauh lebih besar. Peningkatan frekuensi natural tidak terjadi secara linear sehingga kita sulit untuk memprediksi berapa nilai frekuensi natural yang selanjutnya akan muncul.

Cara pembacaan grafik, beserta detail percobaan dan grafik masing-masing data percobaan dilampirkan dalam lampiran. Data dan grafik yang ditampilkan untuk analisa sudah merupakan hasil penggabungan data mentah awal dan pengolahan data akhir.

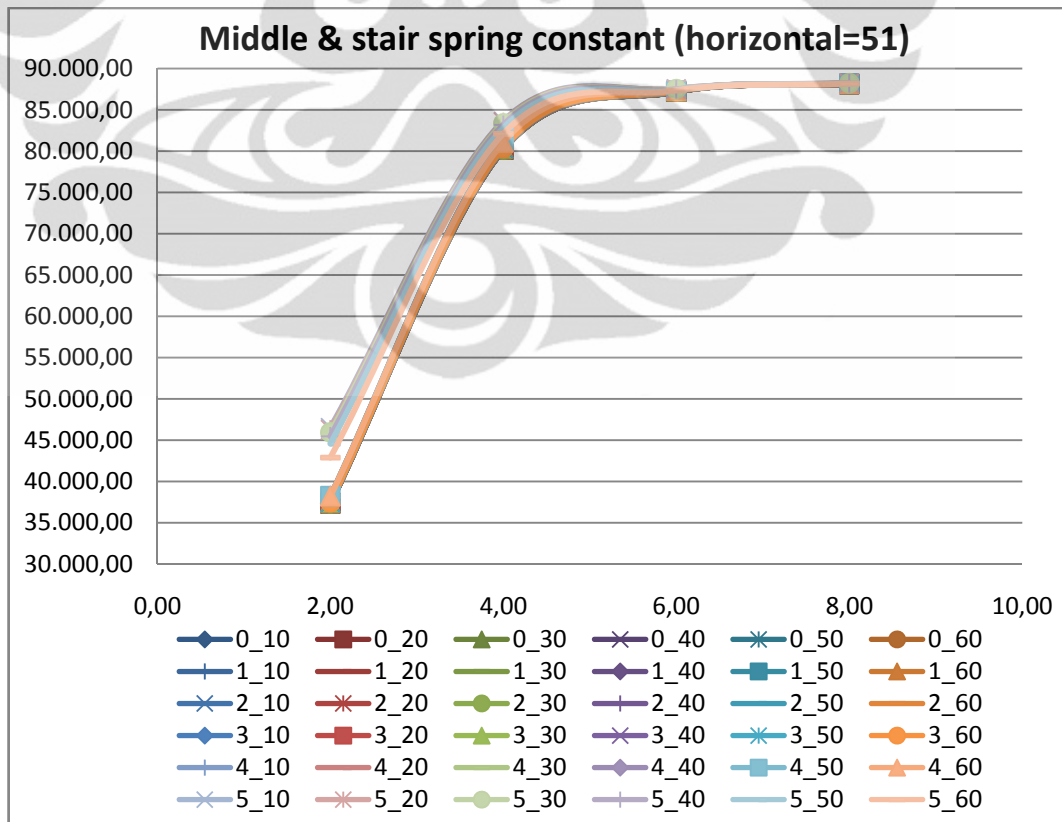
4.4.2 Pengaruh Variasi Bentuk dan Ukuran Spring Tengah Terhadap Frekuensi Natural (Mekanis)

Untuk melihat bagaimana pengaruh banyaknya spring yang dipergunakan, beserta bentuk dan letaknya, maka penulis mencoba melakukan suatu bentuk percobaan dengan menggunakan 2 buah spring pada bagian tengah. Spring tersebut memiliki ukuran yang sama dengan beam tether dan truss tether. Selain itu, pada design juga ditambahkan stair spring. Yang dimaksud dengan stair spring adalah spring pada bagian spring tengah. Tujuan ditambahkannya stair spring ini adalah untuk membuktikan analisa yang ada bahwa frekuensi yang dihasilkan akan semakin membesar akibat penambahan spring yang ada.

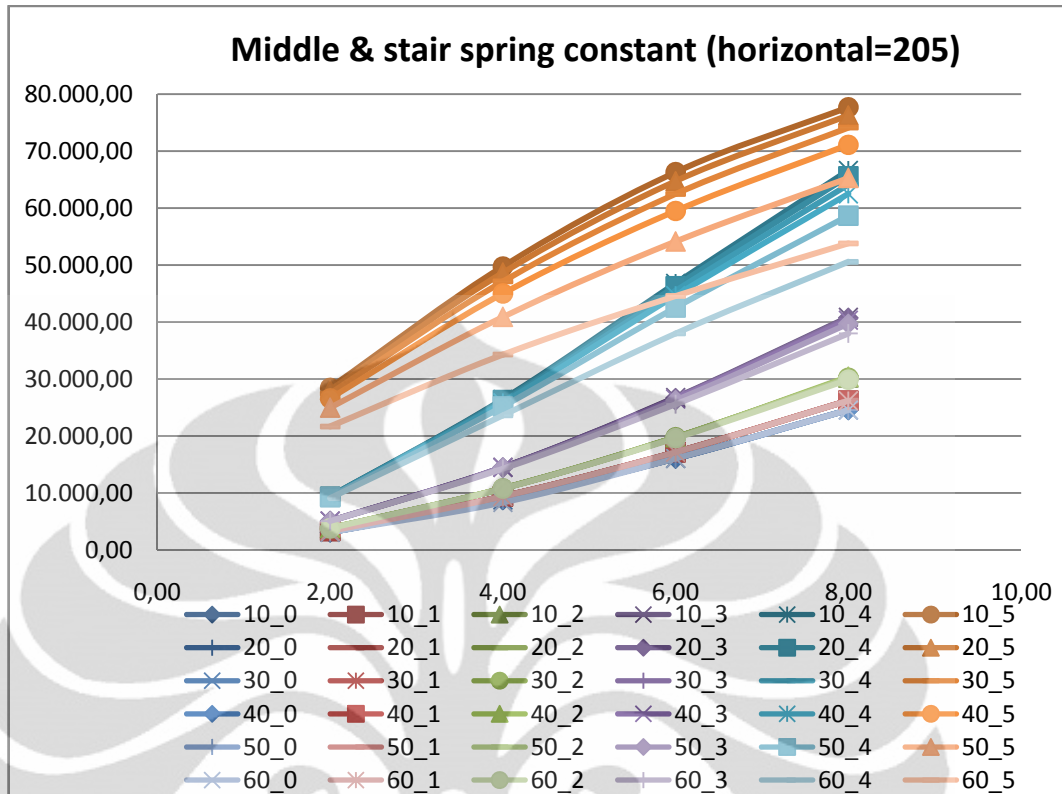
Data disajikan dalam bentuk ringkasan tabel dan grafik yang telah diolah. Untuk tabel lebih lanjut, mengenai bagian-bagian yang dilakukan beserta grafiknya, dapat dilihat pada lampiran. Dari data yang ada, kita dapat menyimpulkan beberapa hal. Pada bagian analisa ini hanya akan ditampilkan grafik yang ada, karena keterbatasan halaman dan ukuran tabel yang sangat besar sehingga membutuhkan tempat yang banyak.



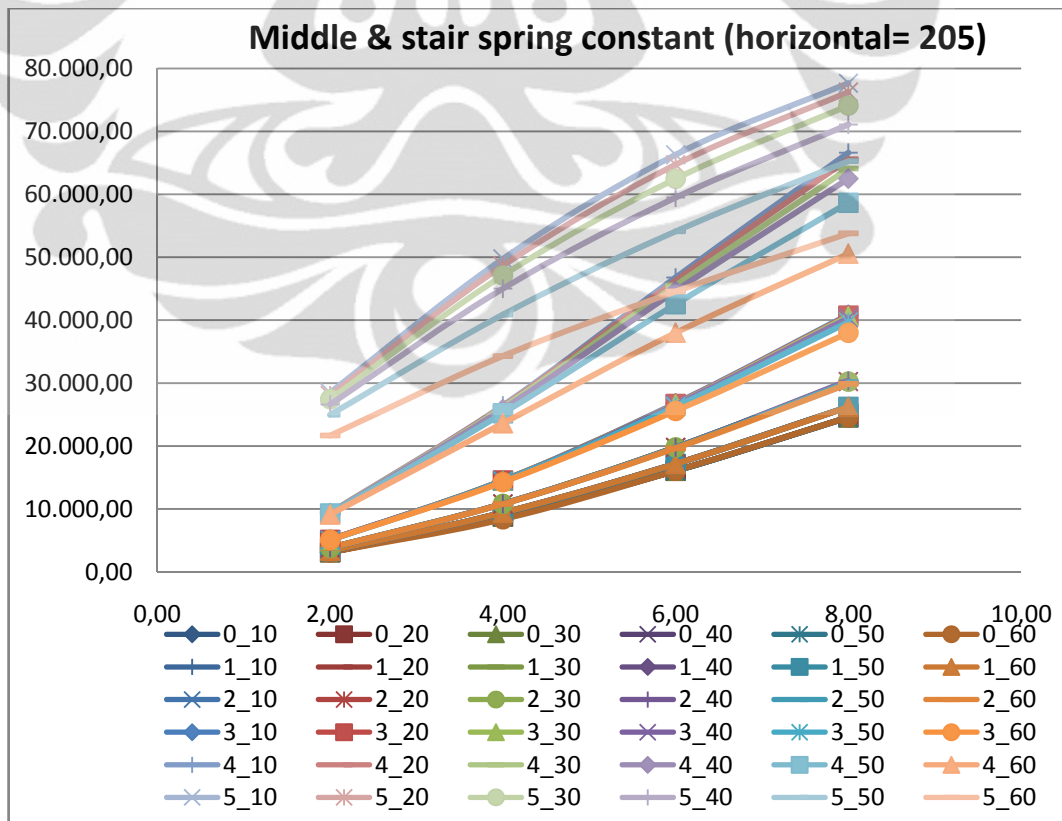
Grafik 4.2a Data Mentah Stair Spring dengan truss tether sepanjang 51 μ m



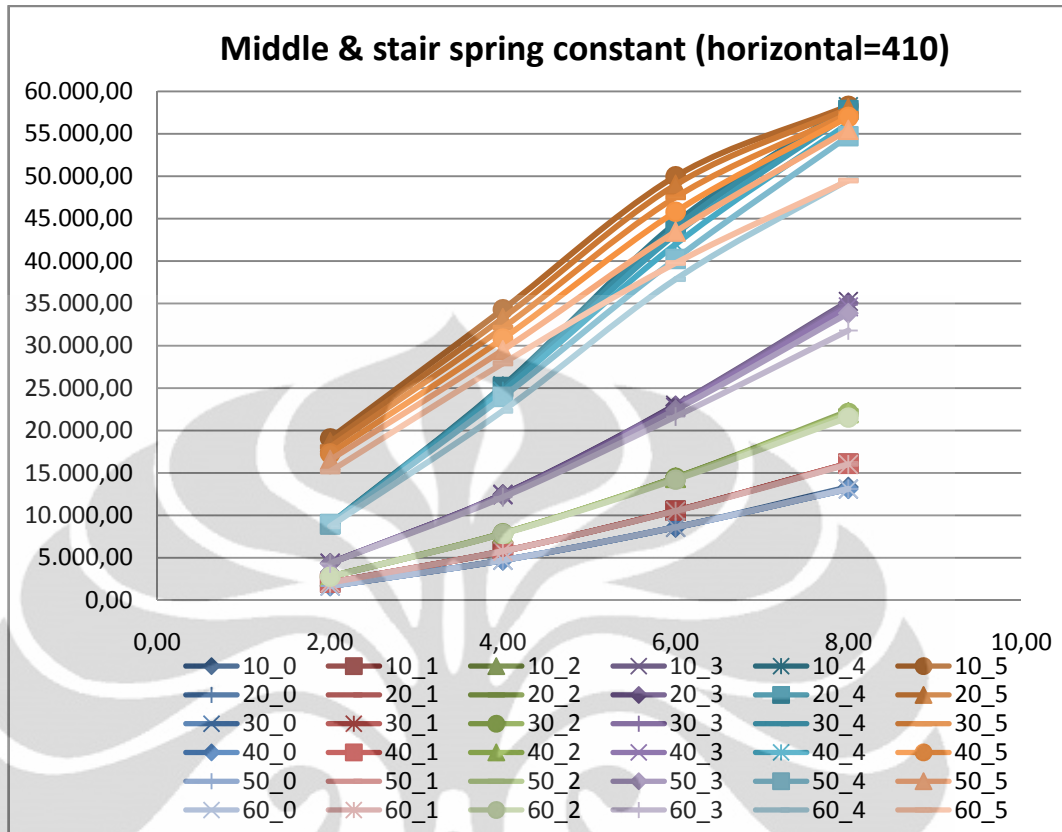
Grafik 4.2b Data Olah Stair Spring dengan truss tether sepanjang 51 μ m



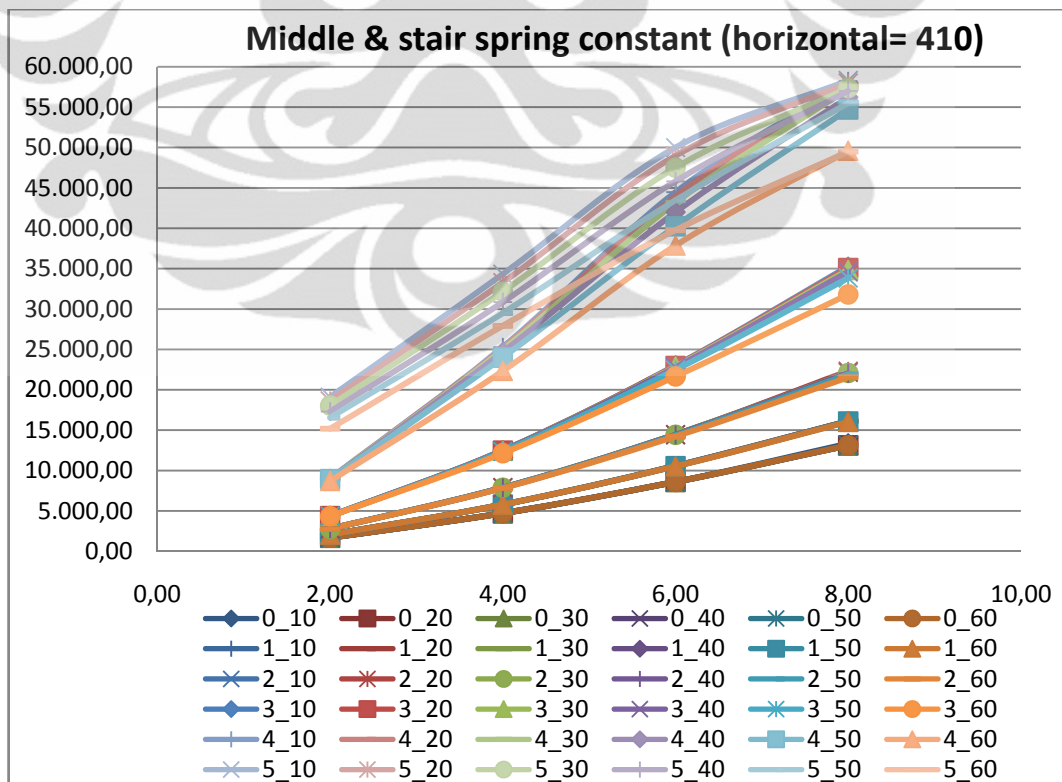
Grafik 4.3e Data Mentah Stair Spring dengan truss tether sepanjang 205µm



Grafik 4.3f Data Olah Stair Spring dengan truss tether sepanjang 205µm



Grafik 4.3g Data Mentah Stair Spring dengan truss tether sepanjang 410 μ m



Grafik 4.3h Data Olah Stair Spring dengan truss tether sepanjang 410 μ m

Dari data grafik yang ada diatas, kita dapat menyimpulkan beberapa hal terkait dengan adanya spring tambahan pada bagian tengah, dengan bentuknya yang menyerupai anak tangga (sehingga disebut dengan stair spring)

1. Frekuensi natural berbanding lurus dengan ketebalan spring. Apabila spring semakin tebal, maka frekuensi natural juga akan semakin besar. Dalam case ini, diasumsikan bahwa stair spring dan letak middle spring konstan.
2. Frekuensi natural berbanding lurus dengan panjang beam tether. Apabila beam tether semakin panjang, maka frekuensi natural juga akan semakin besar. Dalam case ini, diasumsikan bahwa stair spring dan letak middle spring konstan.
3. Frekuensi natural berbanding lurus dengan banyaknya stair spring apabila dikondisikan letak spring tengah dan lebar spring yang dipergunakan konstan.

5.4.3 Pengaruh Variasi Dimensi terhadap Perubahan Konstanta Spring

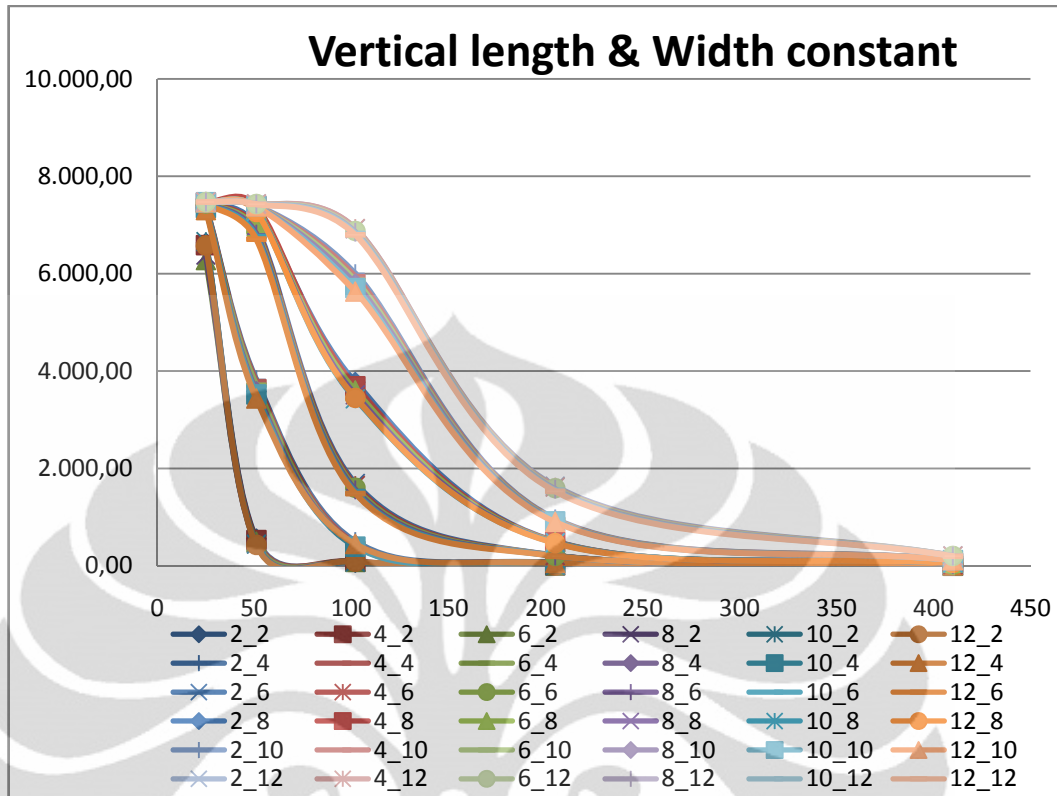
Pengaruh perubahan variasi dimensi terhadap perubahan konstanta spring sebenarnya akan sama dengan perubahan frekuensi mekanis yang dihasilkan oleh design akibat variasi dimensi. Hal ini diakibatkan oleh pengertian yang telah ditanamkan sebenarnya dalam dasar teori bahwa frekuensi mekanis yang dihasilkan berbanding lurus dengan konstanta spring, namun akan berbanding terbalik dengan massa yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan rumus yang ada

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

Berikut ini akan disajikan tabel dari data awal sebelum diolah dan data setelah pengolahan data. Grafik yang dihasilkan akan memiliki bentuk yang sama dengan grafik ketika mencari pengaruh variasi design terhadap frekuensi. Hanya nilainya saja yang berbeda. Oleh karena itu, maka grafik tidak akan ditampilkan kembali. (Massa design sebesar $2,40125 \times 10^{-8}$ kg, massa jenis substitusi $1,7471288 \text{ g/cm}^3 = 1747,1288 \text{ kg/m}^3$ dan massa jenis sebenarnya adalah $2,3128 \text{ g/cm}^3 = 2312,8 \text{ kg/m}^3$)

Tabel 4.3a Percobaan 2a – 2f data mentah
(variasi lebar spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap konstanta spring)

Vertical Length	Horizontal Length	spring constant					
		2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00
2	410	0,98	7,62	26,26	61,83	119,84	205,21
	205	7,90	62,72	212,68	500,14	964,36	1.635,36
	102	64,63	499,29	1.693,93	3.768,96	6.001,80	6.923,91
	51	555,24	3.824,52	6.962,09	7.319,00	7.404,11	7.437,00
	25	6.635,08	7.398,65	7.460,03	7.464,87	7.471,58	7.474,88
	410	0,97	7,76	26,07	62,43	119,08	203,97
4	205	8,43	62,28	209,73	498,70	952,75	1.616,86
	102	85,17	453,64	1.650,43	3.688,63	5.937,62	6.929,89
	51	529,42	3.779,70	6.918,42	7.386,16	7.396,95	7.435,24
	25	6.588,14	7.383,75	7.445,55	7.459,03	7.470,98	7.474,53
	410	0,96	5,99	25,85	60,94	118,17	203,21
	205	7,65	61,28	206,53	486,29	939,13	1.595,00
6	102	76,86	416,23	1.604,02	3.599,23	5.861,38	6.878,68
	51	491,98	3.709,06	6.867,91	7.311,07	7.395,06	7.433,29
	25	6.278,36	7.360,26	7.442,07	7.462,33	7.470,37	7.474,18
	410	0,96	7,63	25,64	60,45	117,24	200,92
	205	8,52	60,33	203,26	478,97	925,51	1.572,94
	102	83,09	429,37	1.560,60	3.513,25	5.791,23	6.852,59
8	51	447,90	3.583,06	6.816,24	7.289,59	7.392,82	7.431,34
	25	6.383,99	7.353,31	7.438,78	7.461,12	7.469,78	7.473,84
	410	0,95	7,57	25,44	59,96	116,31	199,35
	205	7,42	59,41	200,20	471,85	912,10	1.550,97
	102	73,09	394,11	1.520,07	3.431,54	5.704,45	6.825,36
	51	444,14	3.519,65	6.763,54	7.278,64	7.388,93	7.429,40
10	25	6.659,52	7.348,47	7.435,69	7.459,96	7.469,23	7.469,40
	410	2,29	7,51	31,43	59,48	115,39	197,79
	205	7,96	58,53	197,25	464,99	899,08	1.529,50
	102	83,47	446,46	1.482,30	3.449,04	5.631,56	6.797,59
	51	429,61	3.433,58	6.710,19	7.268,56	7.385,10	7.427,50
	25	6.580,05	7.306,01	7.430,77	7.458,88	7.468,71	7.473,23



Grafik 4.3a Percobaan 2a – 2f data mentah
 (variasi lebar spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap konstanta spring)

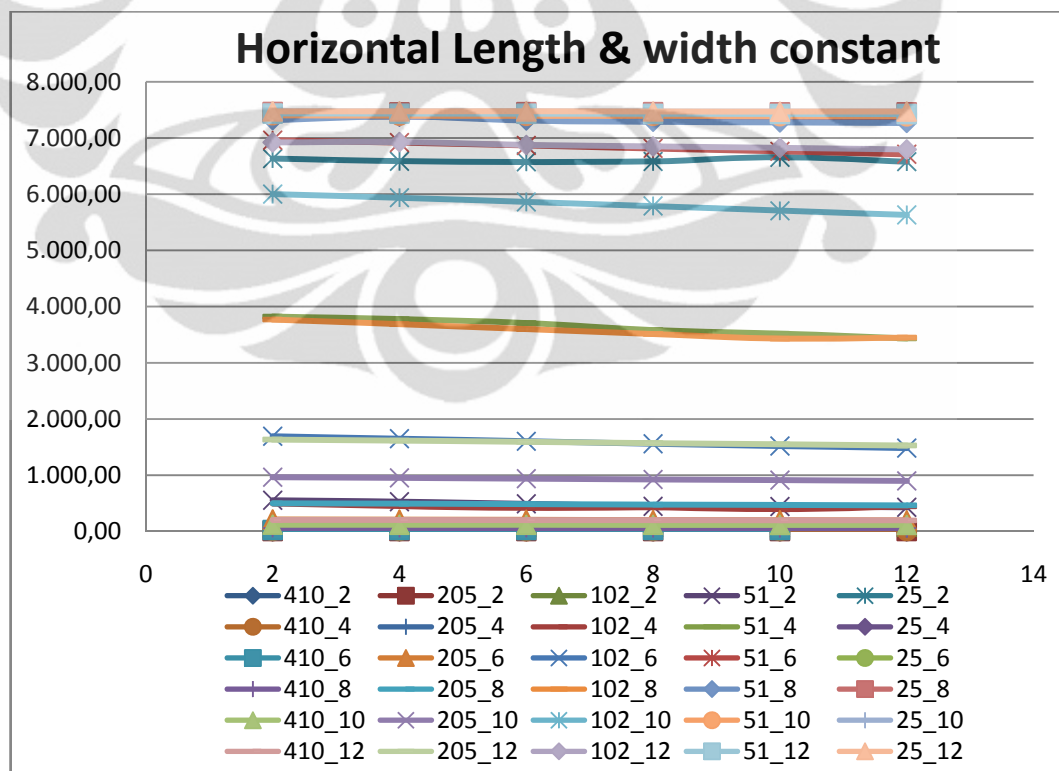
Dari rangkaian percobaan awal (tanpa pengolahan data terlebih dahulu, hanya mempergunakan data asli yang disusun dalam bentuk tabel) mengenai variasi panjang, lebar dan ukuran spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap konstanta spring, kita dapat menyimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Konstanta spring berbanding lurus dengan ketebalan spring yang dipergunakan. Semakin lebar spring yang dipergunakan, maka konstanta spring yang dihasilkan akan semakin besar. Sedangkan semakin sempit lebar spring yang dipergunakan, maka konstanta spring yang dihasilkan akan semakin kecil pula. Hal ini dapat kita temukan apabila kita mengkondisikan *truss tether* dan *beam tether* memiliki ukuran panjang yang konstan.
2. Konstanta spring berbanding terbalik dengan panjang *beam tether*. Semakin panjang *beam tether* yang dipergunakan, maka frekuensi yang dihasilkan akan semakin kecil. Sedangkan semakin pendek *beam tether* yang dipergunakan, maka konstanta spring yang dihasilkan akan semakin

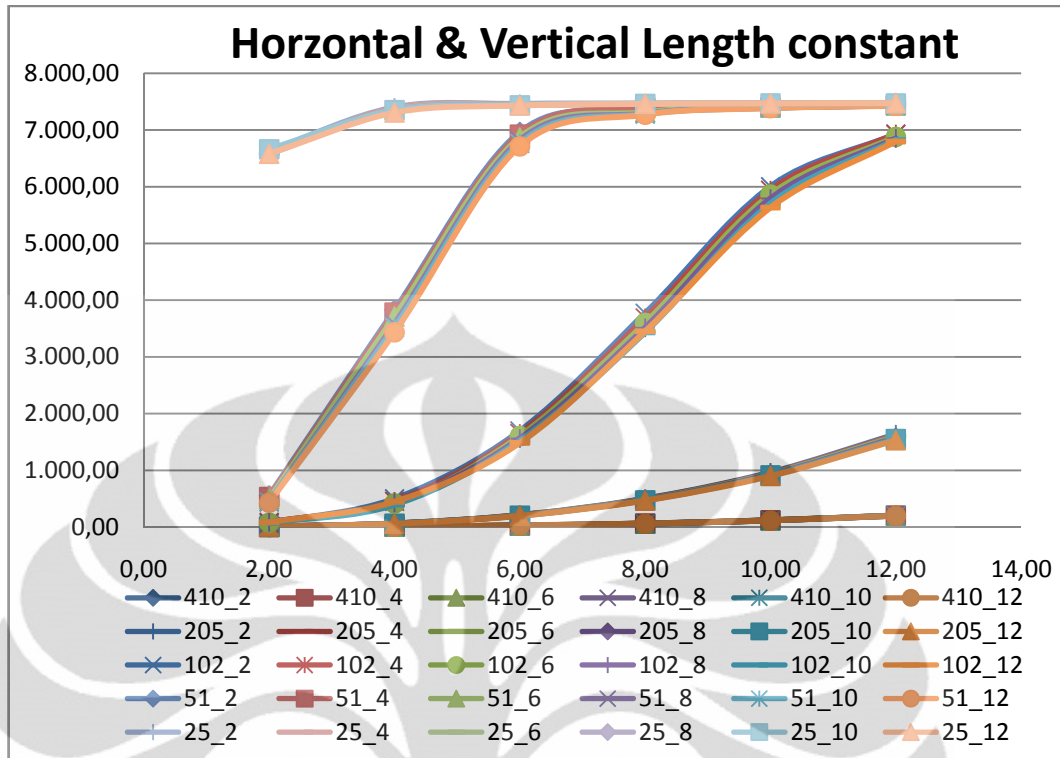
membesar. Hal ini dapat kita temukan apabila kita mengkondisikan lebar spring dan panjang truss tether yang dipergunakan bernilai konstan.

3. Konstanta spring tidak dipengaruhi oleh panjang truss tether. Walau truss tether diperpendek ataupun diperpanjang, konstanta spring yang dihasilkan relatif menghasilkan nilai yang sama. Hal ini dapat kita temukan apabila kita mengkondisikan panjang beam tether dan lebar spring yang dipergunakan bernilai konstan.

Detil percobaan dan grafik masing-masing data percobaan dilampirkan dalam lampiran. Data dan grafik yang ditampilkan untuk analisa sudah merupakan hasil penggabungan data mentah awal dan pengolahan data akhir. Nilai spring constant yang diperoleh pada tabel diatas, merupakan hasil perhitungan dengan menggunakan penurunan rumus seperti yang telah dijabarkan. Oleh karena itu, kita tidak dapat mengetahui secara pasti berapa nilai spring constant untuk mode yang lainnya (Nilai yang diperoleh merupakan nilai hasil perhitungan, yang belum dibuktikan dengan simulasi karena keterbatasan waktu).



Grafik 4.3b Percobaan 2a – 2f data olah
(variasi lebar spring, truss tether dan beam tether terhadap konstanta spring)



Grafik 4.3c Percobaan 2a – 2f data olah
(variasi lebar spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap konstanta spring)

Dari rangkaian percobaan variasi panjang, lebar dan ukuran spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap konstanta spring, kita dapat menyimpulkan:

1. Konstanta spring berbanding lurus dengan lebar spring yang dipergunakan apabila kita mengkondisikan panjang *truss tether* dan *beam tether* konstan. Semakin lebar spring yang dipergunakan, maka konstanta spring yang dihasilkan akan semakin besar. Kenaikan frekuensi natural tidak berlangsung secara linear.
2. Konstanta spring tidak dipengaruhi oleh panjang *truss tether*. Hal ini dapat kita temukan apabila kita mengkondisikan panjang *beam tether* dan lebar spring yang dipergunakan bernilai konstan. Konstanta spring yang dihasilkan tidak akan mempunyai perubahan nilai yang berarti. Sehingga, kita dapat menganggap tidak ada perubahan yang terjadi

3. Konstanta spring berbanding terbalik dengan panjang beam tether. Apabila beam tether yang dipergunakan semakin panjang, maka frekuensi natural yang dihasilkan akan semakin rendah. Apabila beam tether kecil, maka Konstanta spring yang dihasilkan akan jauh lebih besar. Peningkatan frekuensi natural tidak terjadi secara linear sehingga kita sulit untuk memprediksi berapa nilai frekuensi natural yang selanjutnya akan muncul.

Nilai spring constant yang diperoleh pada tabel diatas, merupakan hasil perhitungan dengan menggunakan penurunan rumus seperti yang telah dijabarkan. Oleh karena itu, kita tidak dapat mengetahui secara pasti berapa nilai spring constant untuk mode yang lainnya (Nilai yang diperoleh merupakan nilai hasil perhitungan, yang belum dibuktikan dengan simulasi karena keterbatasan waktu). Dari rangkaian percobaan variasi panjang, lebar dan ukuran spring, truss tether dan beam tether terhadap konstanta spring, kita dapat menyimpulkan:

1. Konstanta spring berbanding lurus dengan lebar spring yang dipergunakan apabila kita mengkondisikan panjang truss tether dan beam tether konstan. Semakin lebar spring yang dipergunakan, maka konstanta spring yang dihasilkan akan semakin besar. Kenaikan frekuensi natural tidak berlangsung secara linear.
2. Konstanta spring tidak dipengaruhi oleh panjang truss tether. Hal ini dapat kita temukan apabila kita mengkondisikan panjang beam tether dan lebar spring yang dipergunakan bernilai konstan. Konstanta spring yang dihasilkan tidak akan mempunyai perubahan nilai yang berarti. Sehingga, kita dapat menganggap tidak ada perubahan yang terjadi
3. Konstanta spring berbanding terbalik dengan panjang beam tether. Apabila beam tether yang dipergunakan semakin panjang, maka frekuensi natural yang dihasilkan akan semakin rendah. Apabila beam tether kecil, maka Konstanta spring yang dihasilkan akan jauh lebih besar. Peningkatan frekuensi natural tidak terjadi secara linear sehingga kita sulit untuk memprediksi berapa nilai frekuensi natural yang selanjutnya akan muncul.

**Tabel 4.3b Percobaan 2a – 2f data olah
(variasi lebar spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap konstanta spring)**

Horizontal Length	Vertical Length	spring constant					
		2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00
410 (-250)	2	0,98	7,62	26,26	61,83	119,84	205,21
	4	0,97	7,76	26,07	62,43	119,08	203,97
	6	0,96	5,99	25,85	60,94	118,17	203,21
	8	0,96	7,63	25,64	60,45	117,24	200,92
	10	0,95	7,57	25,44	59,96	116,31	199,35
	12	2,29	7,51	31,43	59,48	115,39	197,79
205 (-45)	2	7,90	62,72	212,68	500,14	964,36	1.635,36
	4	8,43	62,28	209,73	493,70	952,75	1.616,86
	6	7,65	61,28	206,59	486,29	949,13	1.595,00
	8	8,52	60,33	203,26	478,97	925,51	1.572,94
	10	7,42	59,41	200,20	471,85	912,10	1.550,97
	12	7,96	58,53	197,25	464,99	899,08	1.529,50
102 (58)	2	64,63	499,29	1.693,93	3.768,96	6.001,80	6.923,91
	4	85,17	453,64	1.650,43	3.688,63	5.937,62	6.929,89
	6	76,86	416,23	1.604,02	3.599,23	5.861,38	6.878,68
	8	83,09	429,37	1.560,60	3.513,25	5.791,23	6.852,59
	10	73,09	394,11	1.520,07	3.431,54	5.704,45	6.825,36
	12	83,47	446,46	1.482,30	3.449,04	5.631,56	6.797,59
51 (109)	2	555,24	3.824,52	6.962,09	7.319,00	7.404,11	7.437,00
	4	529,42	3.779,70	6.918,42	7.386,16	7.396,95	7.435,24
	6	491,98	3.709,06	6.867,91	7.311,07	7.395,06	7.433,29
	8	447,90	3.583,06	6.816,24	7.289,59	7.392,82	7.431,34
	10	444,14	3.519,65	6.763,54	7.278,64	7.388,93	7.429,40
	12	429,61	3.433,58	6.710,19	7.268,56	7.385,10	7.427,50
25 (135)	2	6.635,08	7.398,65	7.460,03	7.464,87	7.471,58	7.474,88
	4	6.588,14	7.388,75	7.445,55	7.459,03	7.470,98	7.474,53
	6	6.278,36	7.360,26	7.442,07	7.462,33	7.470,37	7.474,18
	8	6.383,99	7.353,31	7.438,78	7.461,12	7.469,78	7.473,84
	10	6.659,52	7.348,47	7.435,69	7.459,96	7.469,23	7.469,40
	12	6.580,05	7.306,01	7.430,77	7.458,88	7.468,71	7.473,23

4.4.4 Pengaruh Massa Beban Proofmass terhadap Displacement Z (Shagging Analysis)

Untuk menjalankan shagging analysis, yang dipergunakan untuk mengetahui pengaruh massa beban proofmass terhadap pergerakan MEMS pada sumbu z, maka kita perlu untuk sekali lagi mengingat besarnya massa yang dipergunakan pada design ini. Menurut perhitungan yang telah dilakukan penulis, massa design sebesar $2,40125 \times 10^{-8}$ kg, massa jenis substitusi $1,7471288 \text{ g/cm}^3 = 1747,1288 \text{ kg/m}^3$ dan massa jenis sebenarnya $2,3128 \text{ g/cm}^3 = 2312,8 \text{ kg/m}^3$.

Dengan diketahuinya massa design, maka kita dapat menghitung besarnya gaya berat yang menjadi gaya tekan menurut gravitasi. Shagging analysis berfungsi untuk menghitung berapa besarnya perpindahan yang terjadi pada proofmass akibat penekanan pada bagian body oleh gaya berat. Perpindahan yang terjadi akan berada pada sumbu z.

Besarnya gaya tekan F adalah $2,40125 \times 10^{-7}$ N dengan volume design sebesar $1,744 \times 10^{-11} \text{ m}^3$, dan luas permukaan sebesar $3,4360 \times 10^{-7} \text{ m}^2$. Oleh karena itu, maka design akan menghasilkan gaya tekan sebesar $0,6989 \text{ Pa} = 6,989 \times 10^{-7} \text{ MPa}$. Kita harus ingat ketika memasukkan besarnya pressure (stress) karena satuan yang dipergunakan harus dalam MPa, sedangkan hasil perhitungan Pa.

Tabel 4.4 Shagging Analysis
(variasi lebar spring, *truss tether* dan *beam tether* terhadap konstanta spring)

Width (Beam)	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	displacement (μm)
4 (205)	10	0	8.782,19	1,08807E-04
		1	9.392,89	1,01031E-04
		2	10.803,30	1,00995E-04
		3	14.520,40	1,00989E-04
		4	26.443,50	1,00907E-04
	30	0	8.782,19	1,01290E-04
		1	9.395,80	1,01085E-04
		2	10.808,20	1,01052E-04
		3	14.501,70	1,01045E-04
		4	26.113,10	1,00969E-04
		5	47.124,00	1,00722E-04

2 (205)	10	0	3.113,07	2,56538E-04
		1	3.332,09	2,56192E-04
		2	3.828,13	2,56118E-04
		3	5.091,35	2,56105E-04
		4	9.374,18	2,55989E-04
		5	28.466,60	2,55597E-04
	30	0	3.113,07	2,56850E-04
		1	3.332,79	2,56523E-04
		2	3.823,04	2,56453E-04
		3	5.092,10	2,56441E-04
		4	9.350,80	2,56329E-04
		5	27.457,50	2,55951E-04
4 (410)	10	0	8.782,19	1,84796E-04
		1	9.392,89	1,84246E-04
		2	10.803,30	1,84147E-04
		3	14.520,40	1,84128E-04
		4	26.443,50	1,83894E-04
		5	49.754,60	1,83152E-04
	30	0	8.782,19	1,86127E-04
		1	9.395,80	1,85610E-04
		2	10.808,20	1,85518E-04
		3	14.501,70	1,85500E-04
		4	26.113,10	1,85280E-04
		5	47.124,00	1,84578E-04
2 (410)	10	0	3.113,07	3,94341E-04
		1	3.332,09	3,93615E-04
		2	3.828,13	3,93457E-04
		3	5.091,35	3,93431E-04
		4	9.374,18	3,93175E-04
		5	28.466,60	3,92306E-04
	30	0	3.113,07	3,96067E-04
		1	3.332,79	3,95365E-04
		2	3.823,04	3,95215E-04
		3	5.092,10	3,95189E-04
		4	9.350,80	3,94940E-04
		5	27.457,50	3,94099E-04

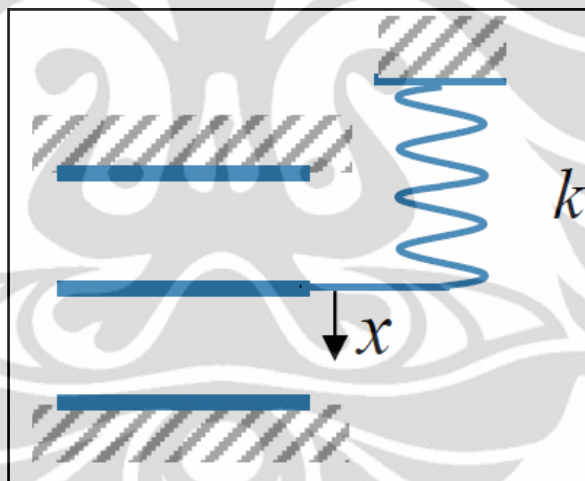
Dari tabel 5.4 percobaan Shagging Analysis yang masih berupa data mentah karena belum diolah sama sekali, kita dapat menyimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Frekuensi natural berbanding terbalik dengan besarnya displacement yang dialami MEMS elektroda ketika lebar spring yang dipergunakan, dan panjang beam tether konstan sedangkan jumlah stair spring dinaikkan. (Jumlah stair spring berbanding lurus dengan frekuensi natural, namun berbanding terbalik dengan displacement yang terjadi)
2. Untuk lebar spring dan panjang beam tether konstan, letak middle spring berbanding terbalik dengan displacement yang terjadi. Apabila jarak middle spring semakin besar dari body, maka displacement yang terjadi akan semakin kecil. Sedangkan ketika jarak middle spring semakin kecil dari body, maka displacement yang terjadi akan semakin besar
3. Untuk panjang beam tether yang konstan, lebar spring berbanding terbalik dengan besarnya displacement yang terjadi. Ketika lebar spring semakin besar, maka displacement yang terjadi akan semakin kecil. Sedangkan ketika lebar spring semakin kecil, maka displacement yang terjadi akan semakin besar.
4. Untuk lebar spring yang konstan, panjang beam tether berbanding lurus dengan displacement yang terjadi. Semakin panjang beam tether yang dipergunakan, maka akan semakin jauh displacement yang terjadi. Sedangkan semakin pendek beam tether yang dipergunakan, maka semakin kecil pula displacement yang terjadi

4.4.5 Pengaruh Variasi Tegangan terhadap Displacement Y

Untuk menghitung variasi tegangan terhadap displacement Y , terlebih dahulu kita harus memahami konsep dari tegangan pulled in (Pulled-in Voltage). Pull-in Voltage adalah besarnya tegangan maksimum yang mungkin diberikan kepada finger hingga batas tertentu, sehingga finger dan fixed part bisa bersinggungan (saling menempel). Pull-in Voltage dapat pula didefinisikan sebagai tegangan dorong yang berfungsi untuk mendekatkan bagian finger dan bagian fixed. Apabila tegangan yang diaplikasikan melebihi nilai tegangan pull-in voltage nya, maka bagian finger dan fixed akan langsung bertempelan. Sedangkan apabila bernilai kurang dari tegangan pull-in, maka pergerakan yang terjadi dapat dihitung dan diatur oleh electric field (medan listrik)

Untuk menghitung pull-in voltage, terlebih dahulu kita harus mengetahui konsep dasarnya. Konsep dasar pull-in voltage dijabarkan melalui gambar berikut



Gambar 4.1 MEMS divais dengan 2 pelat kapasitor paralel sejajar yang mengapit pelat bergerak

$$C = \varepsilon \frac{A_{el}}{d + x} \quad (2)$$

$$C = \varepsilon \frac{A_{el}}{d - x} \quad (3)$$

Untuk mempermudah perhitungan, kita asumsikan displacement x sebesar 0 (benda belum diberikan tegangan sehingga tidak terjadi displacement). Setelah mengasumsikan hal tersebut, kita dapat menghitung berapa besarnya nilai kapasitansi sistem. Nilai tegangan kemudian akan disesuaikan dengan tegangan pull-in yang telah diperhitungkan. Nilai tegangan input harus kurang dari pull-in karena apabila tegangan yang diberikan terlalu besar, bagian finger dan fixed part dapat menempel, yang mengakibatkan hasil pengukuran tidak tepat. Besarnya pull in voltage dapat diturunkan, dan hasil akhirnya diperoleh

$$V_p = \sqrt{\frac{k d^3}{2 \epsilon A_{el}}} \quad (3)$$

Pada design yang telah dibuat, nilai gap kecil adalah $8\mu\text{m}$ dan gap besar adalah $12\mu\text{m}$. Oleh karena itu, kita dapat menyimpulkan, besarnya f elektrik harus dihitung dengan cara mengurangi nilai dari felektrik yang diperoleh ketika gap $12\mu\text{m}$ dengan felektrik gap $8\mu\text{m}$. Berdasarkan rumus yang telah diberikan diatas, maka besarnya pull in voltage untuk salah satu design (width = 2mm, beam tether = 51mm, frekuensi = 37372,4 Hz dan constant spring = 1324,03N/m). Besarnya nilai pull in voltage

$$V_p = \sqrt{\frac{k d^3}{2 \epsilon A_{el}}} = \sqrt{\frac{37372,4 \times (10 \times 10^{-6})^3}{2 \times (8,854187817 \times 10^{-12}) \times (40 \times 250 \times 10^{-6} \times 4 \times 10^{-6})}} = 7263,670509V \quad (4)$$

Nilai pull-in voltage yang diperoleh sangat besar. Hal ini diakibatkan oleh besarnya jarak antara finger yang fixed dengan finger yang melekat pada body. Jarak antara finger fixed dan finger body berbanding lurus dengan besarnya voltage pull-in yang menjadi batas maksimal tegangan yang boleh dicatu ke dalam sistem yang telah kita design. Tabel hasil percobaan variasi tegangan ini, akan digabungkan sehingga dapat lebih memperjelas pembacaannya pada simulasi selanjutnya yang akan dibahas pada bab 4.4.6

Kesimpulan yang dapat diambil dari percobaan ini adalah ketika tegangan semakin diperbesar, maka akan mengakibatkan displacement yang terjadi semakin besar sehingga F elektrostatik yang dihasilkan pun akan menjadi semakin besar.

4.4.6 Pengaruh Variasi Tegangan dan Displacement Y terhadap Gaya Elektrostatik yang dihasilkan

Untuk perhitungan Felektrostatik menggunakan rumus sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A_{el}}{(d-x)^2} V^2 - kx \quad (5)$$

Maka akan diperoleh, untuk tegangan yang diambil antara 0 – 20V dengan jarak 1V dan 0 – 1000V dengan jarak (dimana displacement Y sebesar $2,81253 \times 10^{-6} \mu\text{m}$, dan Luas permukaan Aelektrostatik sebesar $40 \times 10^{-6} \times 250 \times 10^{-6} \times 4 \times 10 = 4 \times 10^{-7} \text{ m}^2$)

Tabel 4.5 Variasi tegangan dan displacement y terhadap F elektrostatik

V	Displacement (μm)	F el (8 μm)	F el (12 μm)	F el
0	0	0,00000E+00	0,00000E+00	0,00000E+00
5	0,00321	6,92289E-07	3,07437E-07	3,84852E-07
10	0,01976	2,78065E-06	1,22975E-06	1,55090E-06
15	0,02381	6,26282E-06	2,76694E-06	3,49588E-06
20	0,04876	1,12039E-05	4,91900E-06	6,28486E-06
25	0,07634	1,76282E-05	7,68594E-06	9,94215E-06
30	0,08635	2,54488E-05	1,10678E-05	1,43809E-05
35	0,12497	3,49792E-05	1,50645E-05	1,99145E-05
40	0,17121	4,62285E-05	1,96761E-05	2,65519E-05
45	0,22689	5,93491E-05	2,49025E-05	3,44458E-05
50	0,27697	7,42238E-05	3,07439E-05	4,34787E-05
55	0,32763	9,10008E-05	3,72002E-05	5,37988E-05
60	0,38749	1,10008E-04	4,42714E-05	6,57344E-05
65	0,46792	1,31879E-04	5,19576E-05	7,99180E-05
70	0,53867	1,55863E-04	6,02586E-05	9,55996E-05
75	0,61359	1,82572E-04	6,91746E-05	1,13391E-04
80	0,66957	2,10911E-04	7,87056E-05	1,32198E-04
85	0,75298	2,43611E-04	8,88516E-05	1,54750E-04
90	0,81134	2,77567E-04	9,96126E-05	1,77942E-04
95	0,92145	3,18961E-04	1,10989E-04	2,07939E-04
100	0,98179	3,59522E-04	1,22980E-04	2,36498E-04

Ada beberapa hal yang dapat kita peroleh dari tabel diatas. Hal-hal itu adalah sebagai berikut:

1. Besarnya gaya F elektrostatik pada gap dengan jarak yang lebih kecil, akan menghasilkan nilai elektrostatik. Apabila gap diperbesar, maka F elektrostatik yang dihasilkan akan semakin kecil.
2. Apabila tegangan V yang diberikan besarnya melebihi V pull in, maka yang akan terjadi adalah finger dapat menempel dengan bagian fixed sehingga mengakibatkan MEMS elektroda kehilangan fungsinya sebagai alat ukur.
3. Tegangan yang diberikan berbanding lurus dengan F elektrostatik yang dihasilkan. Apabila tegangan semakin besar, maka F elektrostatik yang diberikan akan semakin besar.
4. F elektrostatik yang dihasilkan akan saling mengurangi akibat perbedaan arah gaya tarik menarik diantara finger fixed dan finger body. Besarnya gaya yang dihasilkan menurut perhitungan adalah positif karena menggunakan acuan terhadap titik dengan jarak $8 \mu\text{m}$ (gap yang kecil)
5. F elektrostatik yang diperoleh merupakan hasil perhitungan, sehingga untuk mengetahui kebenarannya harus dilakukan simulasi kembali. Pada kesempatan ini, simulasi tidak dapat dilaksanakan karena keterbatasan waktu dan keterbatasan perangkat simulasi yang dipergunakan sehingga tidak dapat mengetahui besarnya gaya elektrostatik yang terjadi pada design yang disimulasikan.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 KESIMPULAN

Tugas akhir yang menjadi materi penelitian penulis adalah perancangan, simulasi dan optimasi sensor spektral molekuler. 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*.

Hipotesa yang terbukti dari hasil percobaan adalah:

1. Variasi dimensi terhadap frekuensi natural
Frekuensi natural berbanding lurus dengan ketebalan spring (width), berbanding terbalik dengan panjang beam tether, dan tidak dipengaruhi oleh ukuran dari truss tether.
2. Variasi dimensi terhadap spring constant
Spring constant berbanding lurus dengan ketebalan spring (width) dan berbanding terbalik dengan panjang dari beam tether. Spring constant berbanding lurus dengan frekuensi natural design
3. Variasi tegangan terhadap displacement y
Variasi tegangan tidak memberikan dampak signifikan karena pull in voltage dari design sangat besar. Hal ini mengakibatkan sulit sekali untuk menyebabkan / mengusik MEMS elektroda sehingga dapat berjalan dengan baik.
4. Variasi shagging analysis terhadap displacement z
Frekuensi natural, letak middle spring, lebar spring yang dipergunakan berbanding terbalik dengan displacement yang terjadi. Sedangkan panjang beam tether berbanding lurus dengan displacement yang terjadi
5. Variasi tegangan terhadap displacement Y
Pull-in Voltage dapat pula didefinisikan sebagai tegangan dorong yang berfungsi untuk mendekatkan bagian finger dan bagian fixed. Apabila tegangan yang diapplied melebihi nilai tegangan pull-in voltage nya, maka

bagian finger dan fixed akan langsung bertempelan. Sedangkan apabila bernilai kurang dari tegangan pull-in, maka pergerakan yang terjadi dapat dihitung dan diatur oleh electric field (medan listrik). Akibat nilai pull in voltage yang besar, maka efek variasi tegangan terhadap displacement menjadi sangat kecil akibat range data yang sangat besar.

6. Variasi tegangan dan displacement Y terhadap gaya elektrostatis yang dihasilkan

Besarnya gaya elektrostatis berbanding terbalik dengan gap / jarak antara finger fixed dan finger yang menempel pada body. Tegangan yang diberikan berbanding lurus dengan gaya elektrostatis yang dihasilkan. Apabila V yang diberikan melebihi pull in voltage, maka dapat menyebabkan finger fixed dan body saling menempel, dan MEMS dapat rusak

Keterangan dari pembuktian hipotesa secara lengkap terdapat dalam bab 4. Pada bagian kesimpulan ini, penulis hanya akan merangkumkan kesimpulan-kesimpulan dan hasil hipotesa yang dapat dibuktikan dari hasil percobaan yang telah dilakukan

DAFTAR ACUAN

- [1] Agus Santoso Tamsir, *Differential Capacitive MEMS Accelerometer with Non-crossing Sensing Element for Airbag Applications*, Bangi : Universiti Kebangsaan Malaysia. 2005.
- [2] Abelé. Nicolas, *Design and Fabrication of Suspended-Gate MOSFETs for MEMS Resonator, Switch and Memory Applications; Thesis doctor 2007*
- [3] C. M. Beck, M. M. Ahmed, C. J. Brierley, dan S. P. Marsh, *Microwave Filters and Switches Produced Using Micro-Machining Technique*,. Marconi Caswell Ltd, 2000.
- [4] Wan-Thai Hsu, *Vibrating RF MEMS for Timing and Frequency References*, Discera, Ann Arbor, MI 48108, U.S.A.
- [5] Lang, W, *Reflexions on the future of Microsystems. Sensors and actuators*, A(72): 1 – 5, 2000.
- [6] Bannon, F. D., Clark, J. R., and Nguyen, C. T.-C.,. “*High frequency microelectromechanical IF filter*”. In Proc. Int. Electron Devices Meeting, pp. 773–779, 1996.
- [7] Menozzi, G. European, *R&D programs for MST/MEMS – NEXUS, Europractice and European MST/MEMS success stories. International Symposium on Micromechatronics and Human Science*: 11 – 22, 2000.
- [8] V. Varadan, K. Vinoy, dan K. Jose., *RF MEMS and their applications*. USA: John Wiley and Sons Ltd., 2003.
- [9] Majlis, Burhanuddin Yeop, *Fabrication of MEMS*, Mems technology seminar, 2005
- [10] Zhang, Hao dan EunSok Kim, *Micromachined Acoustic Resonant Mass Sensor*, JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL.14, NO. 4, AUGUST 2005
- [11] F. Chollet, H. Liu, *A (not so) short introduction to MEMS*, Singapore : Nanyang Technological University, 2008.
- [12] Matej Andrejašič, *MEMS accelerometers*, University of Ljubljana : Department of Physics, 2008.

- [13] Kaajakari, Ville, *Practical Mems: Design Of Microsystems, Accelerometers, Gyroscopes, Rf Mems, Optical Mems, And Microfluidic Systems*, Small Gear Publishing, 2009
- [14] Wong Wai Chi, *Analysis Of The Suspension Beam In Accelerometer For Stiffness Constant And Resonant Frequency By Using Analytical And Numerical Investigation*. Malaysia:Universiti Sains Malaysia, 2007
- [15] Rao, S.S, *Mechanical vibrations*. Pearson Prentice – Hall. New Jersey, 2004.
- [16] Qi Jing, *Modeling and Simulation for Design of Suspended MEMS* Pittsburg, Pennsylvania : Carnegie Mellon University, May 21, 2003.
- [17] Selvakumar, Arjun, *A Multifunctional Silicon Micromachining Technology for High Performance Microsensors and MicroActuators*. The University of Michigan, 2007.
- [18] S. E. Lyshevski, *Mems and Nems: systems, devices and structures*, CRC Press LLC, USA, 2002.
- [19] F. Rudolf, A. Jornod, J. Bergqvist, and H. Leuthold, *Precision accelerometers with $[\mu]g$ resolution*, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 21, 990, pp. 297-302.
- [20] W. Henrion, L. DiSanza, M. Ip, S. Terry, and H. Jerman, *Wide dynamic range direct accelerometer*, 4th IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, pp. 153-157, 1990
- [21] K. Warren, *Navigation grade silicon accelerometer with sacrificially etched IMOX and BESOI structure*, *Tech. Dig. Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, vol. Hilton Head Island, SC, June 1994, pp. 69-72., 1994
- [22] J. Bernstein, R. Miller, W. Kelley, and P. Ward, *Low-noise MEMS vibration sensor for geophysical applications*, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, pp. 433-438., 1999
- [23] J. Chae, H. Kulah, and K. Najafi, *A CMOS-compatible high aspect ratio siliconon- glass in-plane micro-accelerometer*, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp. 336-345., 2005.

- 
- [24] N. Yazdi and K. Najafi, *An all-silicon single-wafer micro-g accelerometer with a combined surface and bulk micromachining process*, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, pp. 544-550., 2000
- [25] S. Renard, C. Pisella, J. Collet, V. Gaff, and J. L. Lauront, *Capacitive pressure and inertial sensors by Epi-SOI surface micromachining*,
- [26] Hongwei Qu, *Development of DRIE-MEMS Process and Integrated*
- [27] Cindy Chairunnissa, *Perancangan Filter Tebar untuk Aplikasi WiMax 2,3 GHz*. Depok : Universitas Indonesia, 2010
- [28] Sunaryo, *Perancangan MEMS Resonator Piezoelektrik Berbentuk Cincin Persegi Mode Kontur Sebagai Osilator WiMax Frekuensi 2,3 GHz*. Depok : Universitas Indonesia, 2010
- [29] Taufik Mardiansyah, *Uji Keakuratan Program Sugar dalam Simulasi Pengaruh Dimensi Akselerometer MEMS Kapasitif Terhadap Pergeseran Proofmass Akibat Pemberian Gaya*, Depok : Universitas Indonesia , 2010
- [30] Marthin Surya Setiawan, *Multistack Metal Z-Axis MEMS Accelerometer dengan Comb Finger Sensing*, Depok : Universitas Indonesia, 2010

LAMPIRAN A PENURUNAN RUMUS KONSTANTA PEGAS STRAIGHT TRUSS FOLDED BEAM

Berikut adalah penurunan rumus untuk mendapatkan nilai konstanta pegas dari *tether* yang berbentuk Straight Truss Folded Beam (STFB).. Bentuk *free body diagram* dari *tether* tersebut dapat dilihat pada gambar A.1

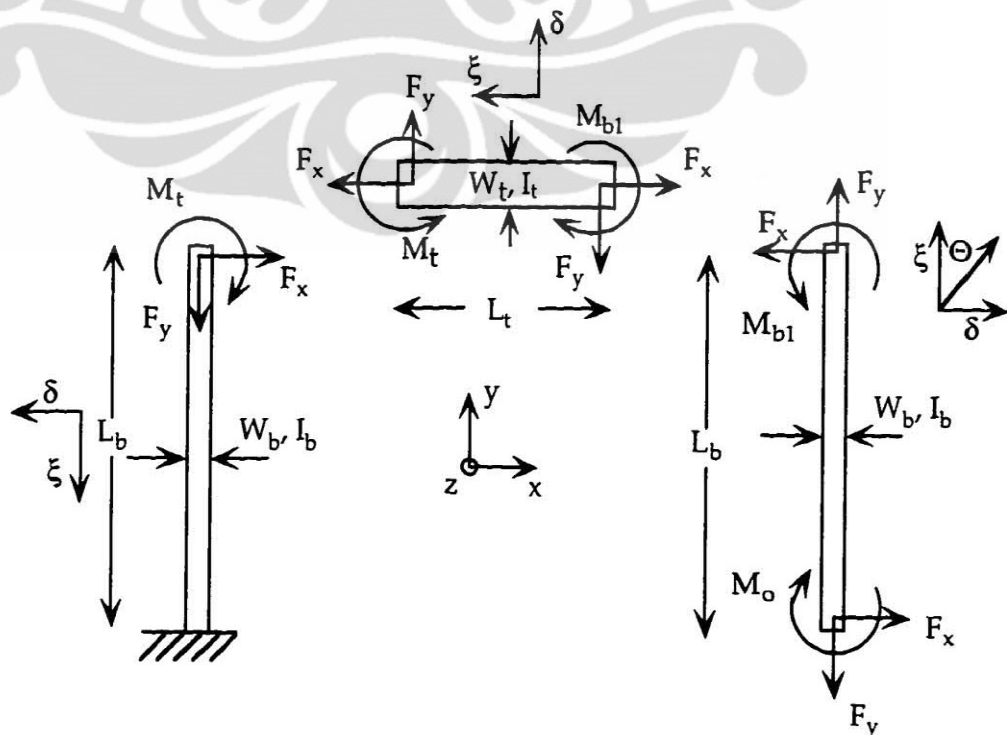
Dari diagram gambar A1, persamaan yang didapat adalah :

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

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

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

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



Gambar A1. Diagram salah satu dari empat *beam* [15]

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

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

pada teorema Castigliano kita dapatkan [14]:

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

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

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

kita dapatkan [14]:

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

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

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

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

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

atau :

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

di mana $\beta = L_t/L_b$

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

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

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

Kemudian dengan menyelesaikan persamaan :

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

Didapatkan :

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

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

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

LAMPIRAN B

PEMBACAAN LEGENDA GRAFIK

Untuk pembacaan legenda grafik 4.1a, contoh 4_2 panjang truss tether $4\mu\text{m}$ dengan lebar spring $2\mu\text{m}$. Keduanya konstan, sedangkan panjang beam tether divariasikan dari $410\mu\text{m}$, $205\mu\text{m}$, $102\mu\text{m}$, $51\mu\text{m}$ dan $25\mu\text{m}$. Frekuensi natural yang dihasilkan adalah sebesar 1017.32Hz , 2886.65Hz , 8257.20Hz , 24201.50Hz dan 83661.30Hz . Sumbu x merupakan panjang beam tether (μm), sedangkan sumbu y merupakan frekuensi natural yang dihasilkan (Hz). Untuk kelima percobaan dengan panjang truss tether $4\mu\text{m}$ dan lebar spring $2\mu\text{m}$ konstan akan diperoleh 5 titik yang berbeda dalam (x,y) yaitu $(410,1017.32)$, $(205,2886.65)$, $(102, 8527.20)$, $(51,24201.50)$ dan $(25,83661.30)$. Dapat dilihat bahwa ketika nilai beam tether dikurangi, terjadi peningkatan frekuensi natural. Ketika nilai beam tether ditambah, frekuensi natural yang diperoleh akan mengalami penurunan. Peningkatan terjadi tidak secara linear. Sehingga dapat dikatakan, panjang beam tether berbanding terbalik dengan frekuensi natural

Untuk pembacaan legenda grafik 4.1b, contoh 410_2 panjang beam tether $410\mu\text{m}$ dengan lebar spring $2\mu\text{m}$. Keduanya konstan, sedangkan panjang truss tether divariasikan dari $2\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$, $6\mu\text{m}$, $8\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ dan $12\mu\text{m}$. Frekuensi natural yang dihasilkan adalah sebesar 1017.32Hz , 1012.88Hz , 1008.79Hz , 1004.73Hz , 1000.73 dan 1553.13 Hz . Sumbu x merupakan panjang truss tether (μm), sedangkan sumbu y merupakan frekuensi natural yang dihasilkan (Hz). Untuk kelima percobaan dengan panjang beam tether $410\mu\text{m}$ dan lebar spring $2\mu\text{m}$ konstan akan diperoleh 5 titik yang berbeda dalam (x,y) yaitu $(2, 1017.32)$, $(4, 1012.88)$, $(6, 1008.79)$, $(8, 1004.73)$, $(10, 1000.73)$ dan $(12,1553.13)$. Dapat dilihat bahwa ketika nilai truss tether ditambah, bisa dikatakan hampir tidak terjadi penurunan yang berarti pada frekuensi natural. Begitu pula jika dibalik. Ketika nilai truss tether dikurangi, tidak ada efek signifikan pada perubahan frekuensi natural. Sehingga dapat dikatakan, panjang truss tether tidak berpengaruh terhadap frekuensi natural yang dihasilkan

Untuk pembacaan legenda grafik 4.1c, contoh 410_2 panjang beam tether 410 μm dengan panjang truss tether 2 μm . Keduanya konstan, sedangkan lebar spring divariasikan dari 2 μm , 4 μm , 6 μm , 8 μm , 10 μm dan 12 μm . Frekuensi natural yang dihasilkan adalah sebesar 1017.32 Hz, 2835.14 Hz, 5262.71 Hz, 8076.39 Hz , 11243.3 dan 14713 Hz. Sumbu x merupakan lebar spring yang dipergunakan (μm), sedangkan sumbu y merupakan frekuensi natural yang dihasilkan (Hz). Untuk kelima percobaan dengan panjang beam tether 410 μm dan panjang truss tether 2 μm konstan akan diperoleh 5 titik yang berbeda dalam (x,y) yaitu (2, 1017.32), (4, 2835.14), (6, 5262.71), (8, 8076.39), (10, 11243.30) dan (12,14713.00). Dapat dikatakan, peningkatan lebar spring yang dipergunakan, akan menyebabkan kenaikan frekuensi natural yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan pernyataan sebelumnya pada bagian analisa bahwa frekuensi natural berbanding lurus dengan lebar spring yang dipergunakan.

Untuk pembacaan legenda grafik 4.2a, yang perlu diperhatikan pertama kali adalah untuk percobaan 4.2, adalah keterangan pada bagian judul grafik “horizontal 51” yang berarti panjang beam tether adalah 51 μm (konstan). Selain itu design yang dipergunakan akan memiliki 2 pasang cantilever pada bagian body tengahnya. Sebagai contoh, 10_5 berarti jarak cantilever tersebut 10 μm dari body bagian atas dan 10 mm dari body bagian bawah. Sedangkan angka 5 adalah banyaknya spring tambahan yang disebut dengan stair spring. Jarak antara stair spring adalah 70 μm . Untuk percobaan ini, dapat dipergunakan nilai truss tether berapapun, karena hanya memberikan pengaruh yang sangat kecil (sudah dibuktikan pada percobaan sebelumnya). Untuk simulasi ini, diasumsikan jarak cantilever dari body sebesar 10 μm dan banyaknya stair spring konstan. Sedangkan lebar spring yang dipergunakan akan divariasikan dari 2 μm , 4 μm , 6 μm , dan 8 μm . Frekuensi natural yang dihasilkan adalah sebesar 46535.00 Hz, 83639.90 Hz, 87571.90 Hz, dan 88250 Hz. Sumbu x merupakan lebar spring yang dipergunakan (μm), sedangkan sumbu y merupakan frekuensi natural yang dihasilkan (Hz). Untuk kelima percobaan dengan panjang beam tether dan jumlah stair spring yang dianggap konstan, kita dapat menemukan 5 buah titik yang berbeda dalam (x, y) yaitu (2, 46535.00), (4, 83639.90), (6, 87571.90), dan (8, 88250). Dapat kita lihat,

seiring dengan penambahan lebar spring yang dipergunakan, maka akan terjadi penambahan frekuensi natural yang diperoleh.

Untuk pembacaan legenda grafik 4.2b, yang perlu diperhatikan pertama kali adalah untuk percobaan 4.2, adalah keterangan pada bagian judul grafik “horizontal 51” yang berarti panjang beam tether adalah 51mm (konstan). Selain itu design yang dipergunakan akan memiliki 2 pasang cantilever pada bagian body tengahnya. Sebagai contoh, 5_10 berarti jarak cantilever tersebut 10 mm dari body bagian atas dan 10 mm dari body bagian bawah. Sedangkan angka 5 adalah banyaknya stair spring tambahan yang disebut dengan stair spring. Jarak antara stair spring adalah 70mm. Untuk percobaan ini, dapat dipergunakan nilai truss tether berapapun, karena hanya memberikan pengaruh yang sangat kecil (sudah dibuktikan pada percobaan sebelumnya). Untuk simulasi ini, diasumsikan jumlah stair spring yang dipergunakan konstan dari body sebesar 10mm dan banyaknya stair spring konstan. Sedangkan lebar spring yang dipergunakan akan divariasikan dari 2 μ m, 4 μ m, 6 μ m, dan 8 μ m. Frekuensi natural yang dihasilkan adalah sebesar 46535.00 Hz, 83639.90 Hz, 87571.90 Hz, dan 88250 Hz. Sumbu x merupakan lebar spring yang dipergunakan (μ m), sedangkan sumbu y merupakan frekuensi natural yang dihasilkan (Hz). Untuk kelima percobaan dengan panjang beam tether dan jumlah stair spring yang dianggap konstan, kita dapat menemukan 5 buah titik yang berbeda dalam (x, y) yaitu (2, 46535.00), (4, 83639.90), (6, 87571.90), dan (8, 88250). Dapat kita lihat, seiring dengan penambahan lebar spring yang dipergunakan, maka akan terjadi penambahan frekuensi natural yang diperoleh. Hal ini konsisten dengan pernyataan pada bagian isi, bahwa lebar spring berbanding lurus dengan frekuensi natural

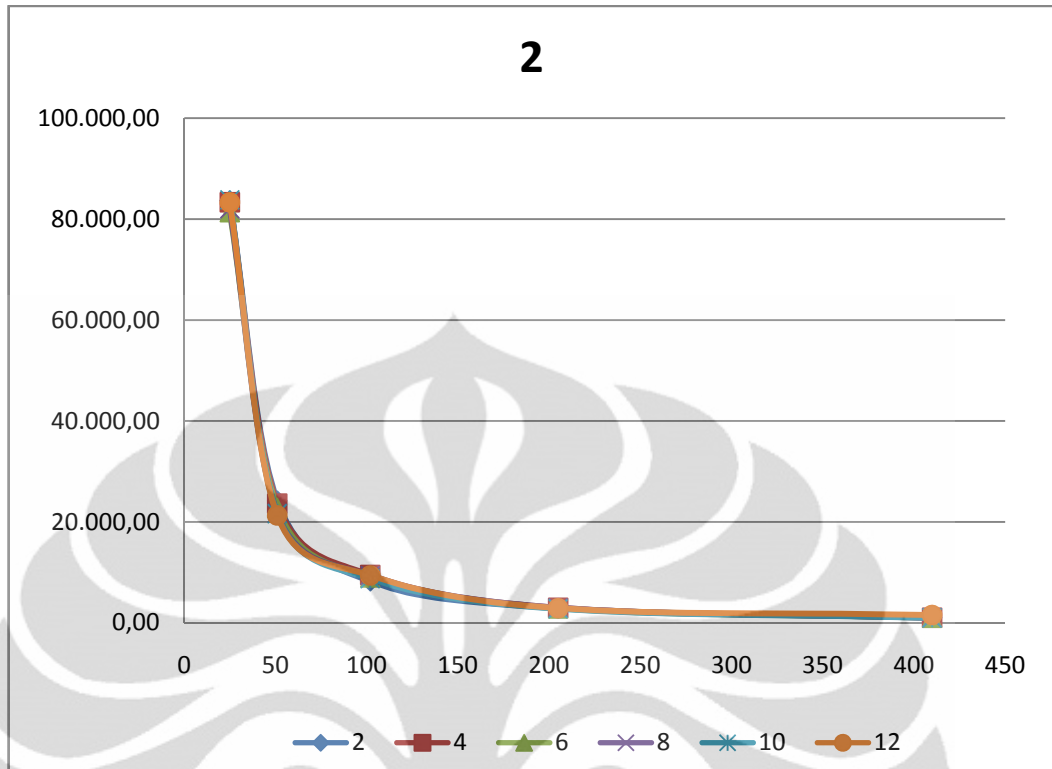
Untuk pembacaan legenda grafik 4.3a dipergunakan cara yang sama dengan pembacaan legenda grafik 4.1a. Hanya saja dalam percobaan ini, sumbu y adalah besarnya nilai constant spring dari simulasi yang telah dilakukan terlebih dahulu. Demikian pula untuk pembacaan legenda grafik 4.3b yang sama dengan pembacaan legenda grafik 4.1b. Nilai constant spring diperoleh dari hasil perhitungan, dengan mempergunakan rumus yang telah dijabarkan pada bab 4.3. Sehingga sebenarnya, tidak ada perbedaan sama sekali dalam pemahaman pembacaan legenda dan grafik dari bab 4.3.

LAMPIRAN C

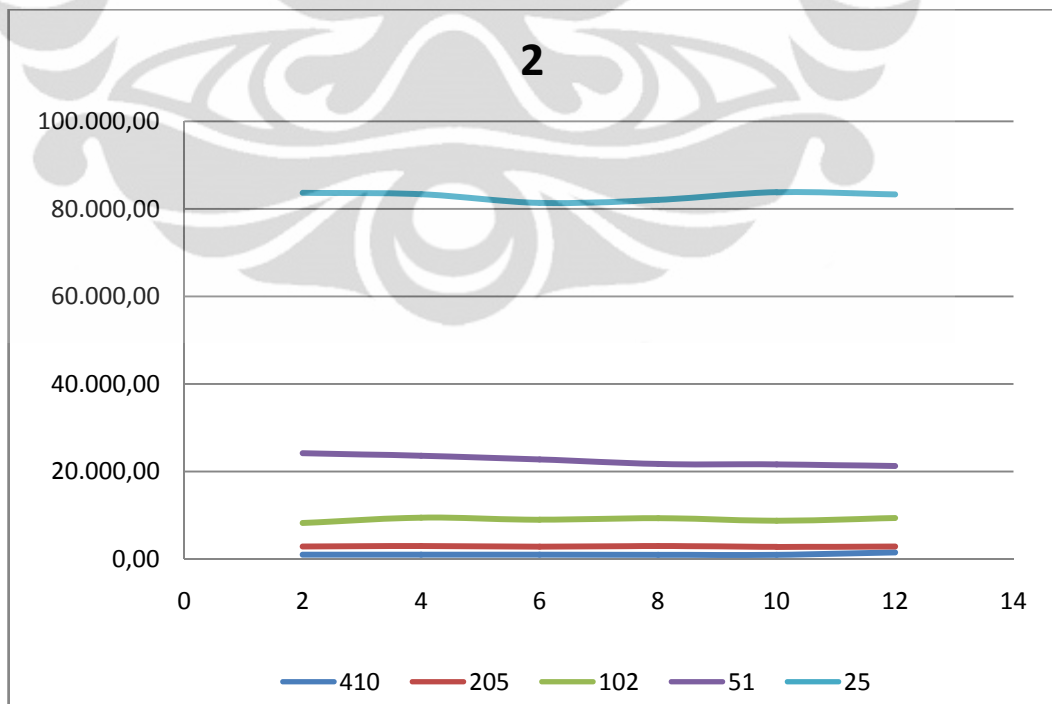
DATA DAN GRAFIK SIMULASI

Tabel 5.1a Data mentah, lebar spring 2 μ m
(lebar spring 2 μ m, variasi *truss tether* & *beam tether* terhadap f.natural)

Width	Truss Tether	Beam Tether	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2	2	410	1.017,32	12.930,80	13.170,00
		205	2.886,65	38.421,70	45.433,40
		102	8.257,20	69.561,20	71.590,00
		51	24.201,50	87.546,90	88.737,50
		25	83.661,30	88.281,60	88.717,90
	4	410	1.012,88	12.840,00	13.311,30
		205	2.982,50	38.282,50	44.487,80
		102	9.478,37	71.860,90	72.866,90
		51	23.632,10	87.644,00	88.799,10
		25	83.364,80	87.546,90	88.744,70
	6	410	1.008,79	12.361,70	12.443,00
		205	2.840,21	37.480,30	43.773,50
		102	9.004,39	68.879,60	72.181,60
		51	22.781,20	85.432,60	88.612,90
		25	81.381,30	86.367,30	88.741,30
	8	410	1.004,73	11.460,00	11.809,20
		205	2.997,60	38.108,00	48.127,10
		102	9.362,40	69.897,10	71.581,80
		51	21.736,60	86.164,60	86.001,80
		25	82.063,00	86.546,40	88.639,40
10	410	1.000,73	10.726,80	11.210,10	
	205	2.796,96	37.198,90	44.050,60	
	102	8.780,57	70.828,00	73.987,80	
	51	21.645,20	85.820,00	83.453,00	
	25	83.815,20	86.114,80	88.845,70	
12	410	1.553,13	11.071,20	11.390,90	
	205	2.897,90	38.146,10	43.463,00	
	102	9.383,80	70.708,70	73.989,00	
	51	21.288,30	85.392,00	88.293,90	
	25	83.313,60	85.146,50	88.784,70	



Grafik 5.1a Data mentah, lebar spring 2µm
 (lebar spring 2µm, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f.natural)



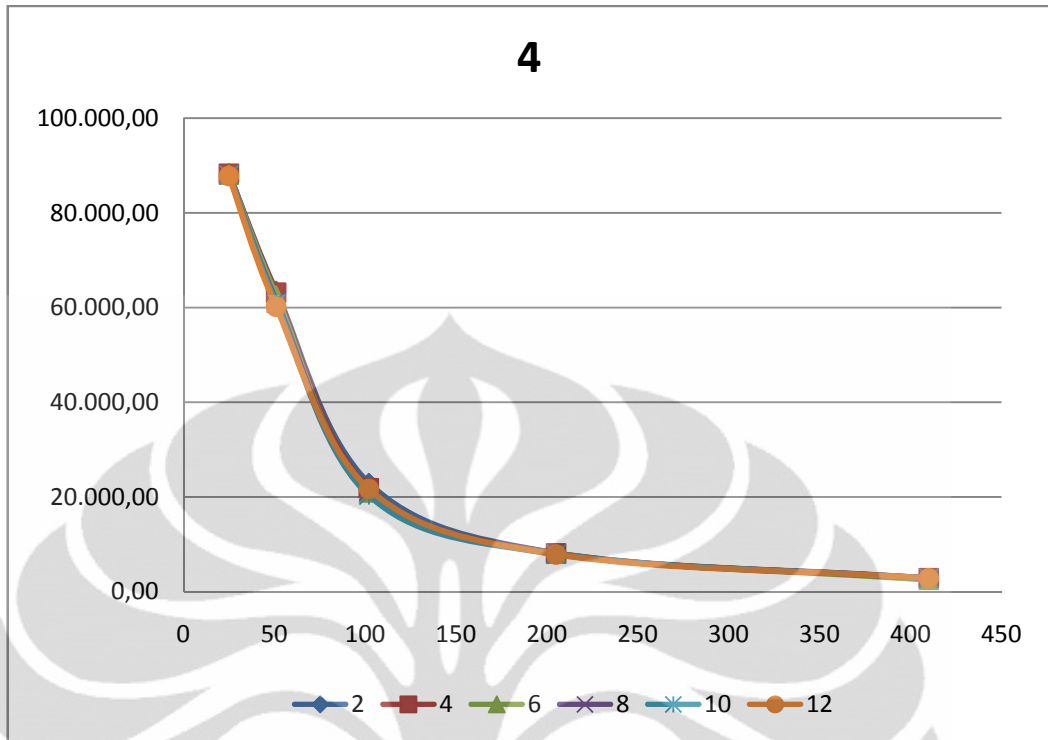
Grafik 5.1b Data olah, lebar spring 2µm
 (lebar spring 2µm, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f.natural)

**Tabel 5.1b Data olah, lebar spring 2 μ m
(lebar spring 2 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *fnatural*)**

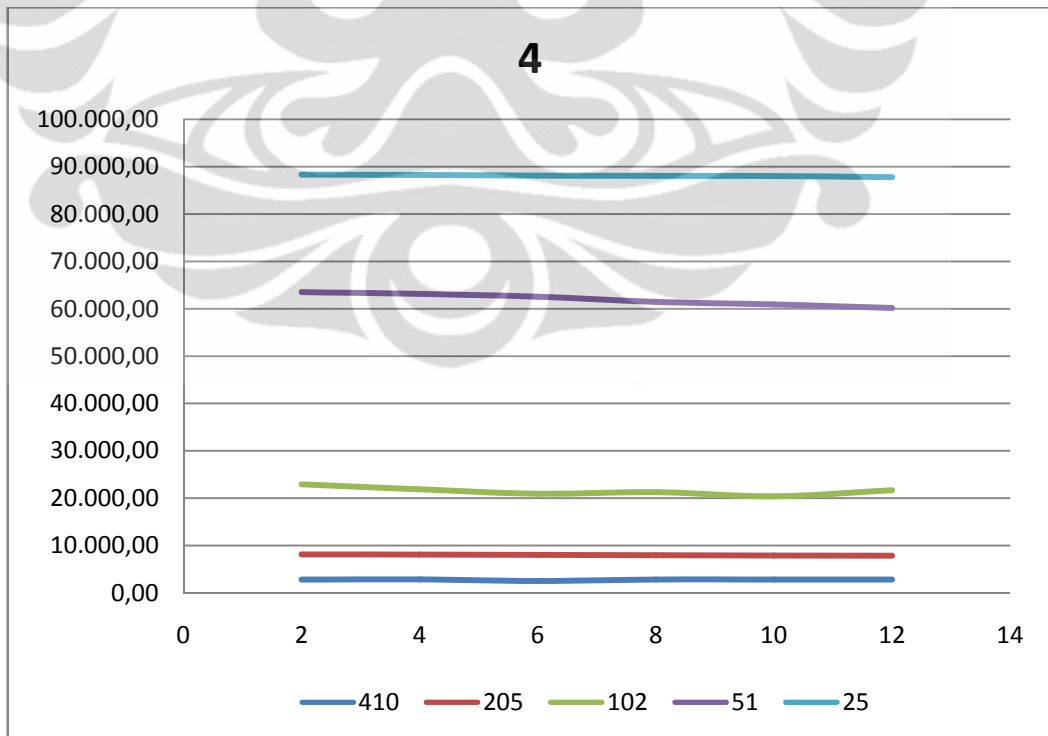
Width	Beam Tether	Truss Tether	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2	410	2	1.017,32	12.930,80	13.170,00
		4	1.012,88	12.840,00	13.311,30
		6	1.008,79	12.361,70	12.443,00
		8	1.004,73	11.460,00	11.809,20
		10	1.000,73	10.726,80	11.210,10
		12	1.553,13	11.071,20	11.390,90
	205	2	2.886,65	38.421,70	45.433,40
		4	2.982,50	38.282,50	44.487,80
		6	2.840,21	37.480,30	43.773,50
		8	2.997,60	38.108,00	48.127,10
		10	2.796,96	37.198,90	44.050,60
		12	2.897,90	38.146,10	43.463,00
	102	2	8.257,20	69.561,20	71.590,00
		4	9.478,37	71.860,90	72.866,90
		6	9.004,39	68.879,60	72.181,60
		8	9.362,40	69.897,10	71.581,80
		10	8.780,57	70.828,00	73.987,80
		12	9.383,80	70.708,70	73.989,00
	51	2	24.201,50	87.546,90	88.737,50
		4	23.632,10	87.644,00	88.799,10
		6	22.781,20	85.432,60	88.612,90
		8	21.736,60	86.164,60	86.001,80
		10	21.645,20	85.820,00	83.453,00
		12	21.288,30	85.392,00	88.293,90
25	2	83.661,30	88.281,60	88.717,90	
	4	83.364,80	87.546,90	88.744,70	
	6	81.381,30	86.367,30	88.741,30	
	8	82.063,00	86.546,40	88.639,40	
	10	83.815,20	86.114,80	88.845,70	
	12	83.313,60	85.146,50	88.784,70	

Tabel 5.2a Data mentah, lebar spring 4 μ m
(lebar spring 4 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f.natural)

Width	Truss Tether	Beam Tether	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4	2	410	2.835,14	24.906,70	25.714,40
		205	8.134,30	57.065,30	67.446,00
		102	22.949,70	88.940,20	88.732,50
		51	63.517,00	88.856,80	88.769,90
		25	88.344,10	88.778,40	88.825,10
	4	410	2.860,86	23.764,20	25.262,80
		205	8.105,62	58.224,90	63.618,70
		102	21.875,40	88.520,10	88.139,40
		51	63.143,70	88.260,30	88.732,60
		25	88.255,10	88.677,40	88.810,80
	6	410	2.513,96	19.714,10	24.261,60
		205	8.040,27	57.964,40	60.350,40
		102	20.954,10	85.210,70	88.646,70
		51	62.550,90	87.921,90	87.873,00
		25	88.114,60	88.469,30	88.640,20
	8	410	2.837,25	20.988,30	23.958,30
		205	7.977,41	57.417,70	57.665,20
		102	21.282,20	86.930,10	84.591,50
		51	61.479,20	87.483,40	88.743,40
		25	88.073,00	88.269,70	88.714,10
10	410	2.825,77	19.769,70	23.202,80	
	205	7.916,52	61.501,50	55.406,40	
	102	20.389,70	86.413,40	74.903,00	
	51	60.932,80	86.784,30	88.756,70	
	25	88.044,00	88.110,00	88.821,60	
12	410	2.814,48	18.704,20	22.400,70	
	205	7.857,58	39.087,80	49.953,10	
	102	21.701,70	85.859,60	77.198,40	
	51	60.183,20	86.207,40	88.799,10	
	25	87.789,30	87.897,60	88.730,40	



Grafik 5.2a Data mentah, lebar spring $4\mu\text{m}$
 (lebar spring $4\mu\text{m}$, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f.natural)



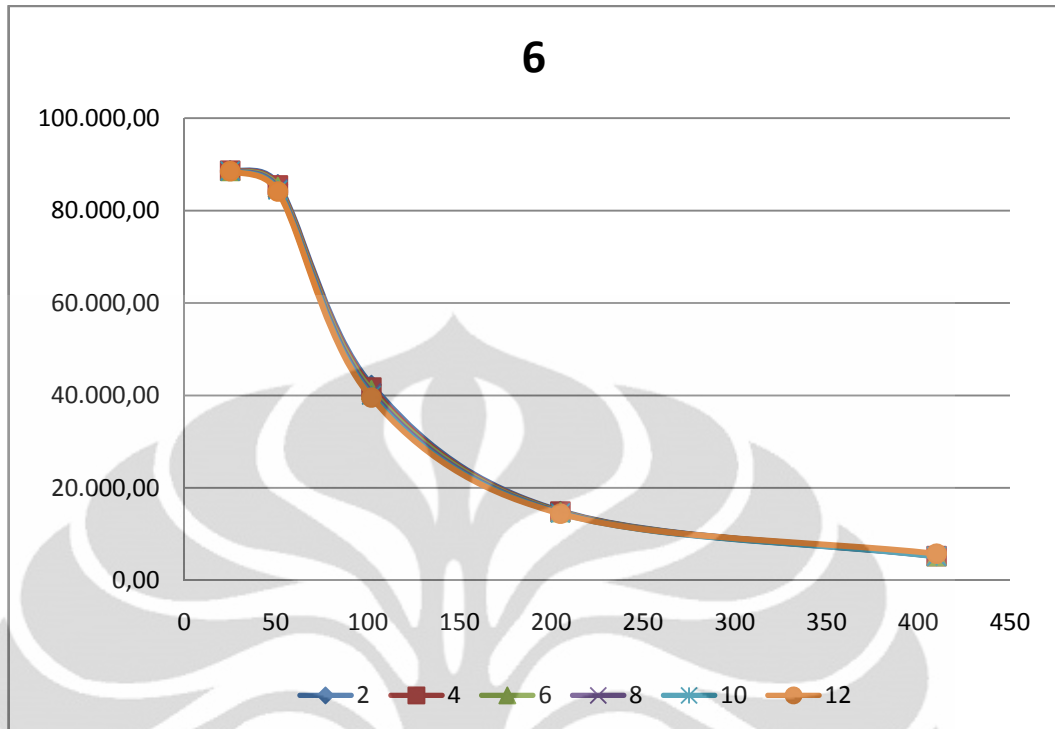
Grafik 5.2b Data olah, lebar spring $4\mu\text{m}$
 (lebar spring $4\mu\text{m}$, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f.natural)

Tabel 5.2b Data olah, lebar spring 4 μ m
(lebar spring 4 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f.natural)

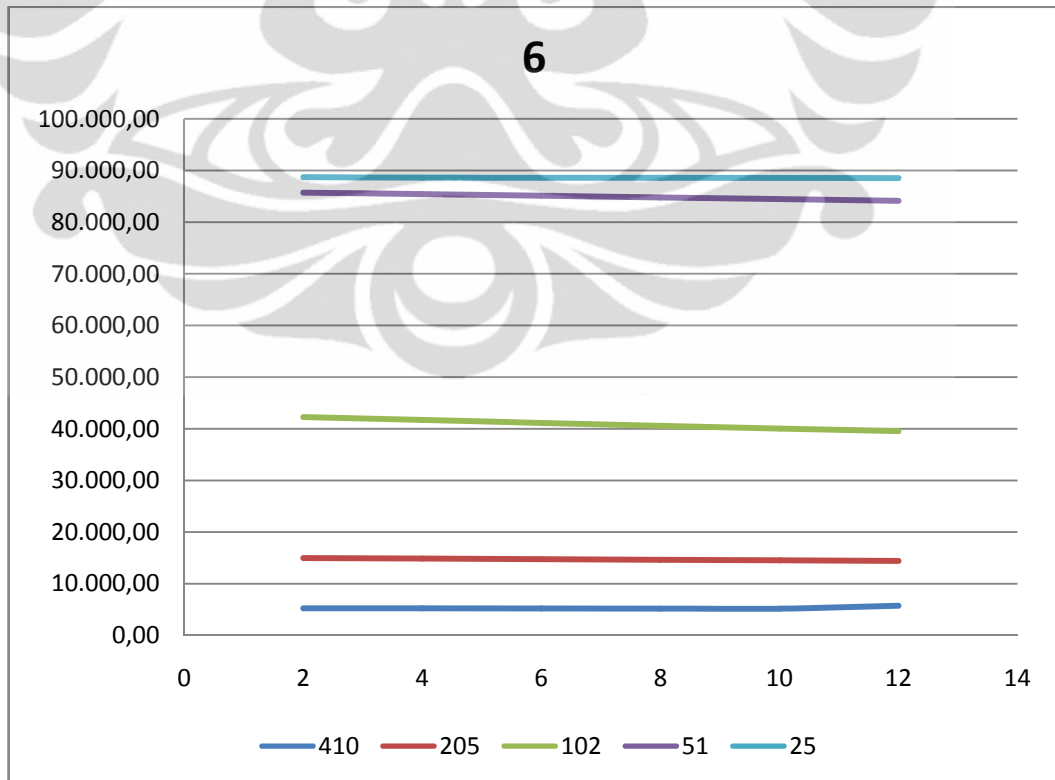
Width	Beam Tether	Truss Tether	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4	410	2	2.835,14	24.906,70	25.714,40
		4	2.860,86	23.764,20	25.262,80
		6	2.513,96	19.714,10	24.261,60
		8	2.837,25	20.988,30	23.958,30
		10	2.825,77	19.769,70	23.202,80
		12	2.814,48	18.704,20	22.400,70
	205	2	8.134,30	57.065,30	67.446,00
		4	8.105,62	58.224,90	63.618,70
		6	8.040,27	57.964,40	60.350,40
		8	7.977,41	57.417,70	57.665,20
		10	7.916,52	61.501,50	55.406,40
		12	7.857,58	39.087,80	49.953,10
	102	2	22.949,70	88.940,20	88.732,50
		4	21.875,40	88.520,10	88.139,40
		6	20.954,10	85.210,70	88.646,70
		8	21.282,20	86.930,10	84.591,50
		10	20.389,70	86.413,40	74.903,00
		12	21.701,70	85.859,60	77.198,40
	51	2	63.517,00	88.856,80	88.769,90
		4	63.143,70	88.260,30	88.732,60
		6	62.550,90	87.921,90	87.873,00
		8	61.479,20	87.483,40	88.743,40
		10	60.932,80	86.784,30	88.756,70
		12	60.183,20	86.207,40	88.799,10
25	2	88.344,10	88.778,40	88.825,10	
	4	88.255,10	88.677,40	88.810,80	
	6	88.114,60	88.469,30	88.640,20	
	8	88.073,00	88.269,70	88.714,10	
	10	88.044,00	88.110,00	88.821,60	
	12	87.789,30	87.897,60	88.730,40	

**Tabel 5.3a Data mentah, lebar spring 6 μ m
(lebar spring 6 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)**

Width	Truss Tether	Beam Tether	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6	2	410	5.262,71	30.870,10	38.470,70
		205	14.978,40	69.374,10	82.945,10
		102	42.271,60	75.483,20	86.345,20
		51	85.698,10	88.777,10	88.818,20
		25	88.709,80	88.787,80	88.835,60
	4	410	5.243,90	29.720,90	37.773,70
		205	14.874,10	65.517,10	79.661,20
		102	41.725,40	88.274,10	88.717,60
		51	85.428,90	88.774,10	88.804,30
		25	88.623,70	88.782,40	88.829,40
	6	410	5.222,40	28.569,90	36.988,20
		205	14.760,20	63.738,70	77.124,20
		102	41.134,50	88.026,90	88.732,90
		51	85.116,50	88.354,20	88.769,20
		25	88.603,00	88.780,90	88.824,20
	8	410	5.201,08	27.433,30	36.125,30
		205	14.643,00	58.787,10	74.157,30
		102	40.573,90	87.723,00	88.740,90
		51	84.795,70	88.243,10	88.894,30
		25	88.583,40	88.779,20	88.817,30
10	410	5.180,04	26.347,70	35.198,80	
	205	14.532,10	55.944,50	71.885,80	
	102	40.043,60	87.353,40	88.812,60	
	51	84.467,30	88.188,10	88.724,90	
	25	88.565,00	88.777,10	88.808,00	
12	410	5.758,13	29.377,70	43.130,60	
	205	14.424,70	53.433,90	69.875,70	
	102	39.543,00	86.905,40	88.778,90	
	51	84.133,50	88.005,60	88.731,00	
	25	88.535,70	88.775,00	88.802,30	



Grafik 5.3a Data mentah, lebar spring $6\mu\text{m}$
 (lebar spring $6\mu\text{m}$, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)



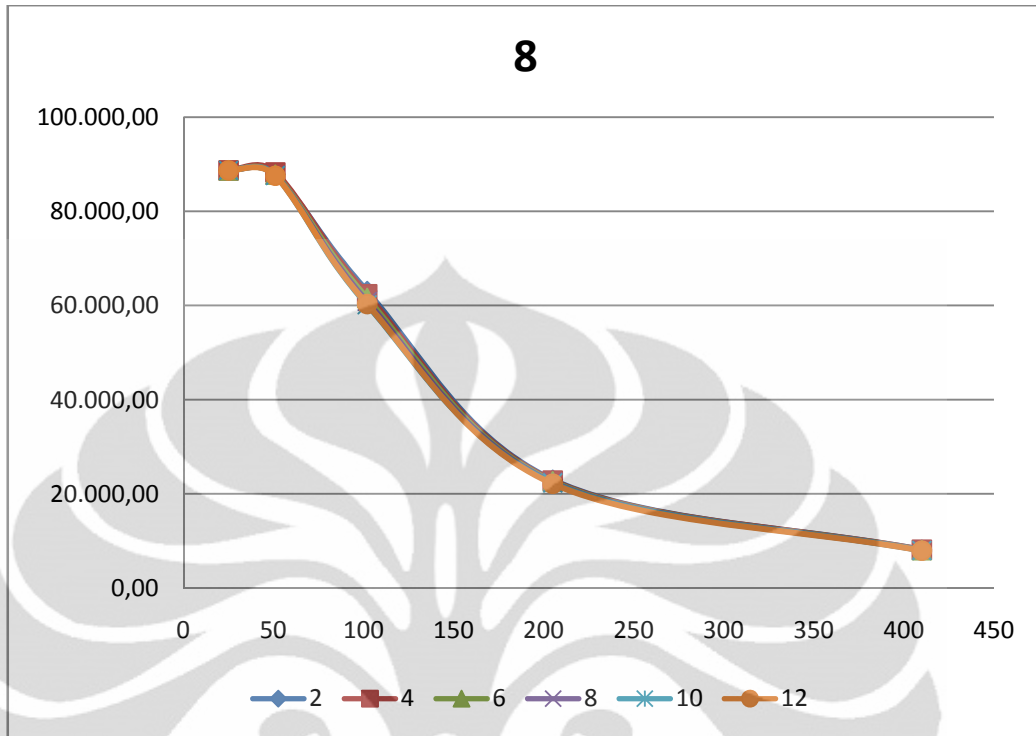
Grafik 5.3b Data olah, lebar spring $6\mu\text{m}$
 (lebar spring $6\mu\text{m}$, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)

Grafik 5.3b Data olah, lebar spring 6 μ m
(lebar spring 6 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f.natural)

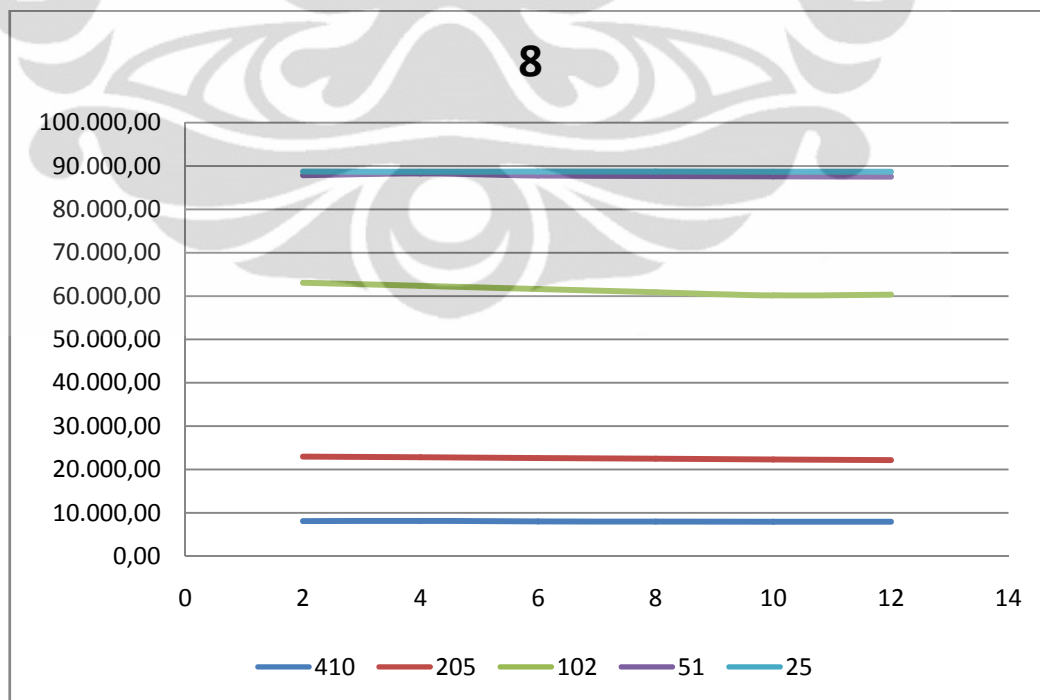
Width	Beam Tether	Truss Tether	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6	410	2	5.262,71	30.870,10	38.470,70
		4	5.243,90	29.720,90	37.773,70
		6	5.222,40	28.569,90	36.988,20
		8	5.201,08	27.433,30	36.125,30
		10	5.180,04	26.347,70	35.198,80
		12	5.758,13	29.377,70	43.130,60
	205	2	14.978,40	69.374,10	82.945,10
		4	14.874,10	65.517,10	79.661,20
		6	14.760,20	63.738,70	77.124,20
		8	14.643,00	58.787,10	74.157,30
		10	14.532,10	55.944,50	71.885,80
		12	14.424,70	53.433,90	69.875,70
	102	2	42.271,60	75.483,20	86.345,20
		4	41.725,40	88.274,10	88.717,60
		6	41.134,50	88.026,90	88.732,90
		8	40.573,90	87.723,00	88.740,90
		10	40.043,60	87.353,40	88.812,60
		12	39.543,00	86.905,40	88.778,90
	51	2	85.698,10	88.777,10	88.818,20
		4	85.428,90	88.774,10	88.804,30
		6	85.116,50	88.354,20	88.769,20
		8	84.795,70	88.243,10	88.894,30
		10	84.467,30	88.188,10	88.724,90
		12	84.133,50	88.005,60	88.731,00
25	2	88.709,80	88.787,80	88.835,60	
	4	88.623,70	88.782,40	88.829,40	
	6	88.603,00	88.780,90	88.824,20	
	8	88.583,40	88.779,20	88.817,30	
	10	88.565,00	88.777,10	88.808,00	
	12	88.535,70	88.775,00	88.802,30	

**Grafik 5.4a Data mentah, lebar spring 8 μ m
(lebar spring 8 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f.natural)**

Width	Truss Tether	Beam Tether	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8	2	410	8.076,39	35.534,76	50.967,60
		205	22.969,30	78.468,50	88.797,40
		102	63.053,90	88.797,50	88.819,40
		51	87.867,30	88.778,00	88.828,30
		25	88.738,60	88.790,40	88.835,70
	4	410	8.115,05	30.505,70	49.502,80
		205	22.820,90	75.324,60	88.023,60
		102	62.378,40	88.489,50	88.694,20
		51	88.269,50	88.779,50	88.830,80
		25	88.703,90	88.789,90	88.834,10
	6	410	8.017,43	33.551,70	49.140,60
		205	22.648,90	72.411,40	87.732,10
		102	61.617,80	88.411,10	88.123,40
		51	87.819,70	88.870,10	88.874,10
		25	88.723,50	88.788,20	88.788,20
	8	410	7.985,18	32.588,00	48.111,90
		205	22.477,90	69.690,10	87.511,10
		102	60.877,40	88.260,20	88.721,20
		51	87.690,60	88.773,50	88.806,80
		25	88.716,30	88.786,90	88.829,60
	10	410	7.953,02	31.649,90	47.021,50
		205	22.310,20	67.167,40	85.352,20
		102	60.165,30	88.103,60	88.727,70
		51	87.624,70	88.567,40	88.798,50
		25	88.709,40	88.785,40	88.826,40
12	410	7.921,31	30.751,00	45.881,70	
	205	22.147,40	64.845,70	83.384,60	
	102	60.318,50	84.926,00	89.386,00	
	51	87.564,00	87.564,20	88.997,80	
	25	88.703,00	88.784,40	88.822,30	



Grafik 5.4a Data mentah, lebar spring 8µm
(lebar spring 8µm, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)



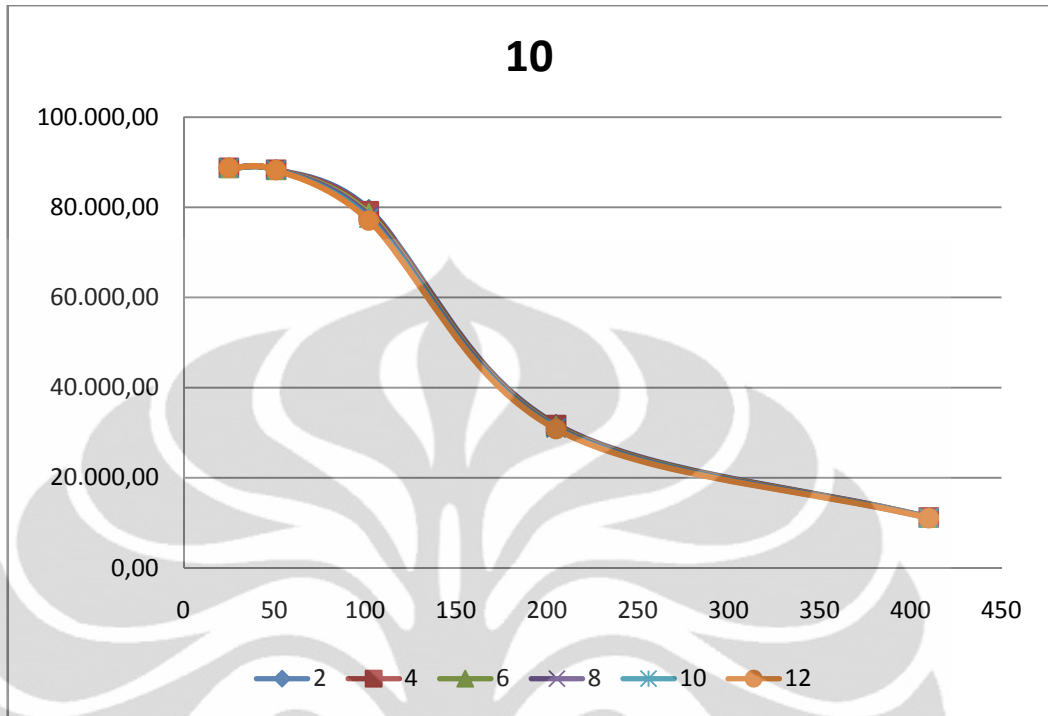
Grafik 5.4b Data olah, lebar spring 8µm
(lebar spring 8µm, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)

Tabel 5.4b Data olah, lebar spring 8 μ m
(lebar spring 8 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f.natural)

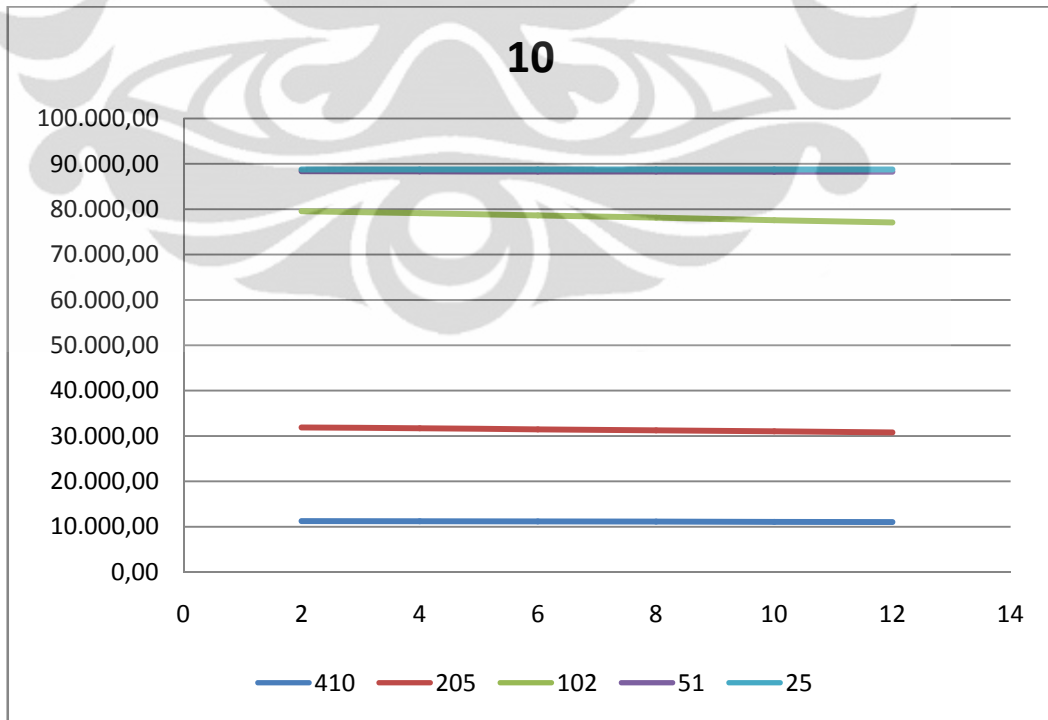
Width	Beam Tether	Truss Tether	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8	410	2	8.076,39	35.534,76	50.967,60
		4	8.115,05	30.505,70	49.502,80
		6	8.017,43	33.551,70	49.140,60
		8	7.985,18	32.588,00	48.111,90
		10	7.953,02	31.649,90	47.021,50
		12	7.921,31	30.751,00	45.881,70
	205	2	22.969,30	78.468,50	88.797,40
		4	22.820,90	75.324,60	88.023,60
		6	22.648,90	72.411,40	87.732,10
		8	22.477,90	69.690,10	87.511,10
		10	22.310,20	67.167,40	85.352,20
		12	22.147,40	64.845,70	83.384,60
	102	2	63.053,90	88.797,50	88.819,40
		4	62.378,40	88.489,50	88.694,20
		6	61.617,80	88.411,10	88.123,40
		8	60.877,40	88.260,20	88.721,20
		10	60.165,30	88.103,60	88.727,70
		12	60.318,50	84.926,00	89.386,00
	51	2	87.867,30	88.778,00	88.828,30
		4	88.269,50	88.779,50	88.830,80
		6	87.819,70	88.870,10	88.874,10
		8	87.690,60	88.773,50	88.806,80
		10	87.624,70	88.567,40	88.798,50
		12	87.564,00	87.564,20	88.997,80
25	2	88.738,60	88.790,40	88.835,70	
	4	88.703,90	88.789,90	88.834,10	
	6	88.723,50	88.788,20	88.788,20	
	8	88.716,30	88.786,90	88.829,60	
	10	88.709,40	88.785,40	88.826,40	
	12	88.703,00	88.784,40	88.822,30	

**Tabel 5.5a Data mentah, lebar spring 10 μ m
(lebar spring 10 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)**

Width	Truss Tether	Beam Tether	<i>f.natural</i> 1	<i>f.natural</i> 2	<i>f.natural</i> 3
10	2	410	11.243,30	39.551,10	63.250,70
		205	31.894,90	85.673,00	87.989,20
		102	79.568,70	88.783,70	88.818,60
		51	88.376,70	88.780,60	88.832,10
		25	88.778,50	88.797,80	88.836,90
	4	410	11.207,70	38.636,50	62.207,20
		205	31.702,30	83.017,90	87.998,10
		102	79.142,10	88.782,10	88.805,80
		51	88.334,00	88.738,90	88.829,00
		25	88.774,90	88.796,60	88.836,00
	6	410	11.164,80	37.778,90	61.085,00
		205	31.474,90	80.565,00	88.154,70
		102	78.632,40	88.564,20	88.349,30
		51	88.322,70	88.779,00	88.826,50
		25	88.771,30	88.795,50	88.834,90
	8	410	11.120,90	36.939,80	59.894,00
		205	31.245,90	78.244,90	87.976,50
		102	78.160,40	88.654,20	88.976,80
		51	88.309,30	88.778,10	88.822,60
		25	88.767,80	88.794,50	88.833,70
10	410	11.076,60	36.120,10	58.645,90	
	205	31.018,70	76.049,50	87.772,10	
	102	77.572,60	88.567,70	88.423,70	
	51	88.286,10	88.777,00	88.817,90	
	25	88.764,50	88.793,50	88.832,30	
12	410	11.032,70	35.325,20	57.351,10	
	205	30.796,50	73.980,00	87.539,00	
	102	77.075,40	88.301,00	88.718,80	
	51	88.263,20	88.775,40	88.812,20	
	25	88.761,40	88.792,40	88.830,70	



Tabel 5.5a Data mentah, lebar spring 10 μ m
(lebar spring 10 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)



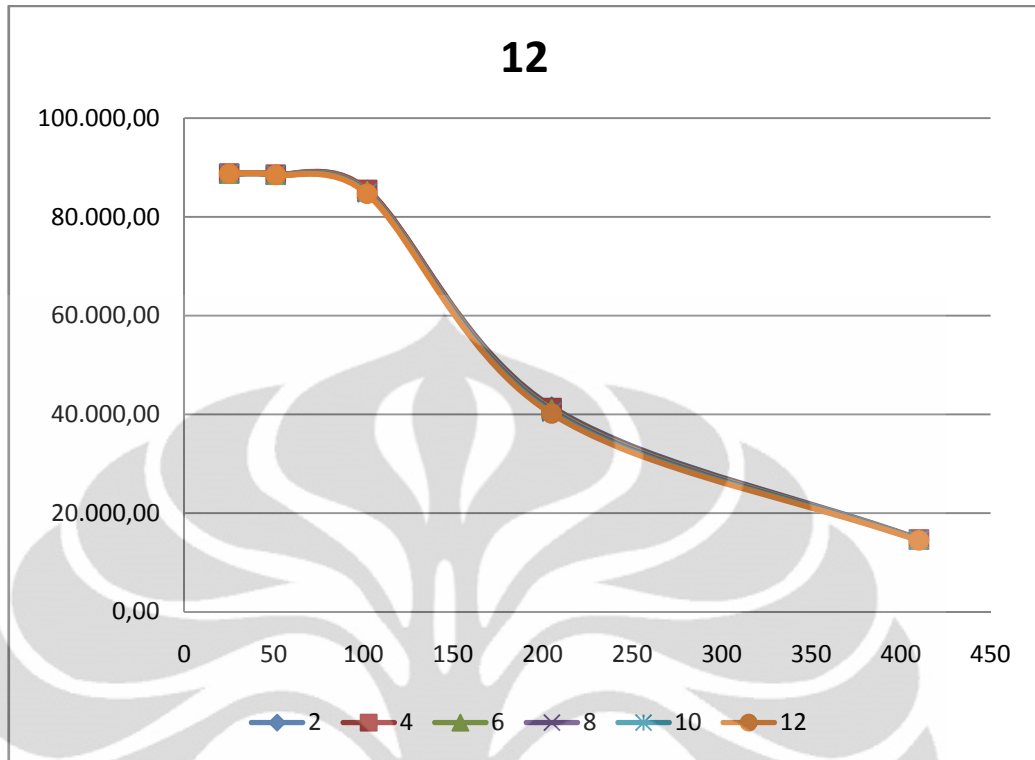
Grafik 5.5b Data olah, lebar spring 10 μ m
(lebar spring 10 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)

**Tabel 5.5b Data olah, lebar spring 10 μ m
(lebar spring 10 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f_{natural})**

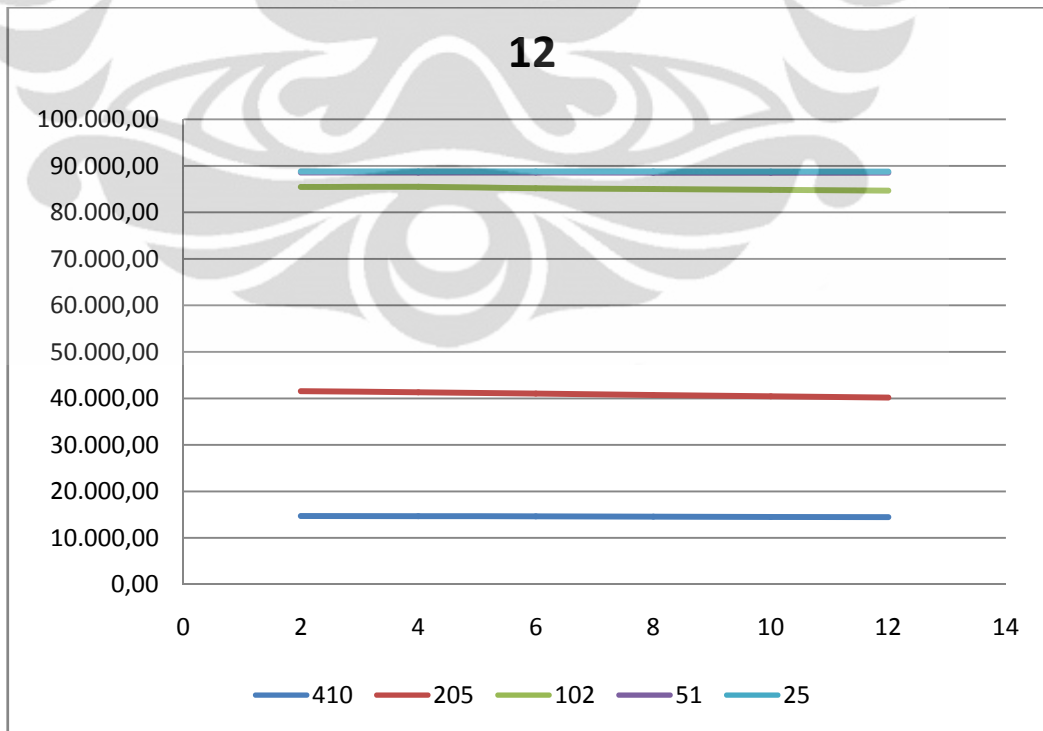
Width	Beam Tether	Truss Tether	$f_{\text{natural 1}}$	$f_{\text{natural 2}}$	$f_{\text{natural 3}}$
10	410	2	11.243,30	39.551,10	63.250,70
		4	11.207,70	38.636,50	62.207,20
		6	11.164,80	37.778,90	61.085,00
		8	11.120,90	36.939,80	59.894,00
		10	11.076,60	36.120,10	58.645,90
		12	11.032,70	35.325,20	57.351,10
	205	2	31.894,90	85.673,00	87.989,20
		4	31.702,30	83.017,90	87.998,10
		6	31.474,90	80.565,00	88.154,70
		8	31.245,90	78.244,90	87.976,50
		10	31.018,70	76.049,50	87.772,10
		12	30.796,50	73.980,00	87.539,00
	102	2	79.568,70	88.783,70	88.818,60
		4	79.142,10	88.782,10	88.805,80
		6	78.632,40	88.564,20	88.349,30
		8	78.160,40	88.654,20	88.976,80
		10	77.572,60	88.567,70	88.423,70
		12	77.075,40	88.301,00	88.718,80
	51	2	88.376,70	88.780,60	88.832,10
		4	88.334,00	88.738,90	88.829,00
		6	88.322,70	88.779,00	88.826,50
		8	88.309,30	88.778,10	88.822,60
		10	88.286,10	88.777,00	88.817,90
		12	88.263,20	88.775,40	88.812,20
25	2	88.778,50	88.797,80	88.836,90	
	4	88.774,90	88.796,60	88.836,00	
	6	88.771,30	88.795,50	88.834,90	
	8	88.767,80	88.794,50	88.833,70	
	10	88.764,50	88.793,50	88.832,30	
	12	88.761,40	88.792,40	88.830,70	

**Tabel 5.6a Data mentah, lebar spring 12 μ m
(lebar spring 12 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f natural)**

Width	Truss Tether	Beam Tether	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
12	2	410	14.713,00	43.113,40	71.835,40
		205	41.534,40	88.794,40	88.812,50
		102	85.462,80	88.777,50	88.823,30
		51	88.572,80	88.783,60	88.834,20
		25	88.798,10	88.804,90	88.837,60
	4	410	14.668,30	42.263,50	71.009,90
		205	41.298,80	88.567,80	88.656,50
		102	85.499,70	88.676,00	88.719,20
		51	88.562,30	88.782,90	88.832,70
		25	88.796,00	88.803,90	88.837,00
	6	410	14.641,10	41.488,20	70.248,20
		205	41.018,70	87.180,90	88.665,40
		102	85.183,20	88.774,60	88.811,50
		51	88.550,70	88.782,20	88.830,90
		25	88.793,90	88.802,80	88.836,40
	8	410	14.558,20	40.738,70	69.509,40
		205	40.734,00	85.169,80	88.252,40
		102	85.021,50	88.772,20	88.803,80
		51	88.539,10	88.781,50	88.828,70
		25	88.791,90	88.801,80	88.835,70
	10	410	14.501,30	40.008,30	68.787,10
		205	40.448,60	83.247,90	88.132,10
		102	84.852,40	88.789,70	88.332,40
		51	88.527,50	88.780,80	88.826,20
		25	88.765,50	88.790,00	88.835,00
12	410	14.444,50	39.297,10	68.074,30	
	205	40.167,60	81.411,50	87.998,50	
	102	84.679,60	88.665,70	88.357,90	
	51	88.516,20	88.780,00	88.823,20	
	25	88.788,30	88.800,10	88.833,90	



Grafik 5.6a Data mentah, lebar spring 12 μ m
 (lebar spring 12 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)



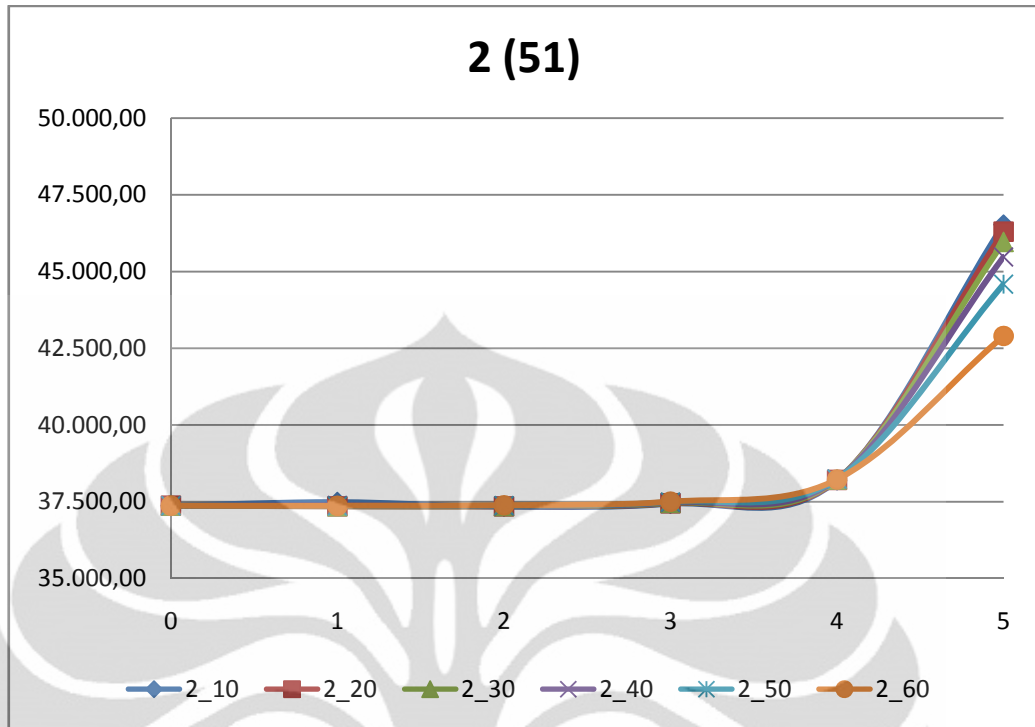
Grafik 5.6b Data olah, lebar spring 12 μ m
 (lebar spring 12 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap *f.natural*)

**Tabel 5.6b Data olah, lebar spring 12 μ m
(lebar spring 12 μ m, variasi *truss tether* dan *beam tether* terhadap f_{natural})**

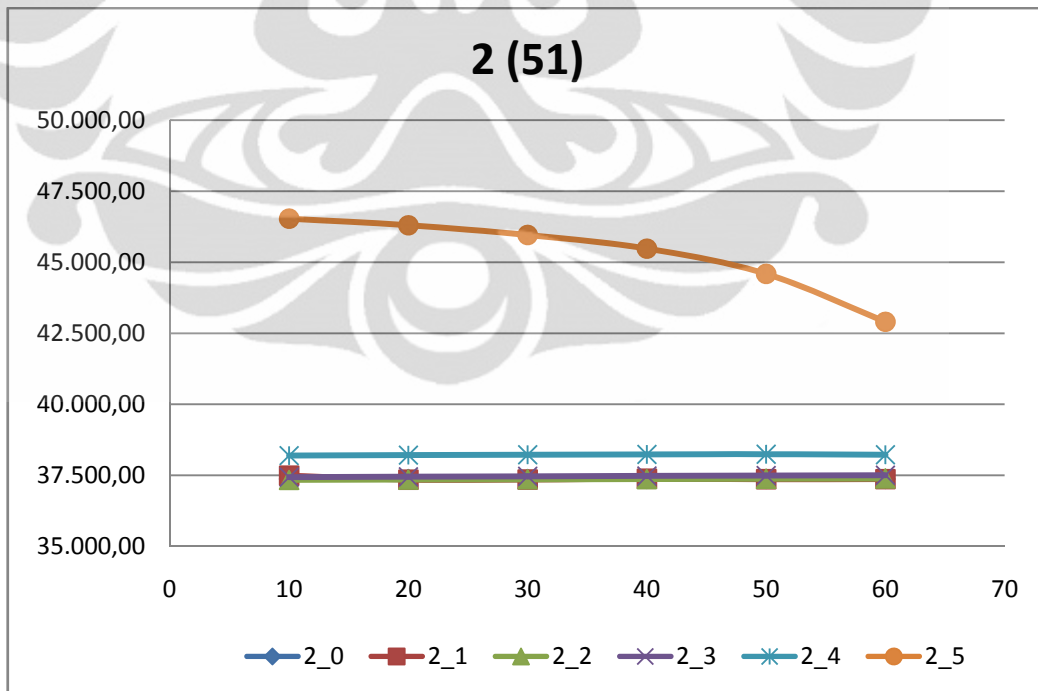
Width	Beam Tether	Truss Tether	$f_{\text{natural 1}}$	$f_{\text{natural 2}}$	$f_{\text{natural 3}}$
12	410	2	14.713,00	43.113,40	71.835,40
		4	14.668,30	42.263,50	71.009,90
		6	14.641,10	41.488,20	70.248,20
		8	14.558,20	40.738,70	69.509,40
		10	14.501,30	40.008,30	68.787,10
		12	14.444,50	39.297,10	68.074,30
	205	2	41.534,40	88.794,40	88.812,50
		4	41.298,80	88.567,80	88.656,50
		6	41.018,70	87.180,90	88.665,40
		8	40.734,00	85.169,80	88.252,40
		10	40.448,60	83.247,90	88.132,10
		12	40.167,60	81.411,50	87.998,50
	102	2	85.462,80	88.777,50	88.823,30
		4	85.499,70	88.676,00	88.719,20
		6	85.183,20	88.774,60	88.811,50
		8	85.021,50	88.772,20	88.803,80
		10	84.852,40	88.789,70	88.332,40
		12	84.679,60	88.665,70	88.357,90
	51	2	88.572,80	88.783,60	88.834,20
		4	88.562,30	88.782,90	88.832,70
		6	88.550,70	88.782,20	88.830,90
		8	88.539,10	88.781,50	88.828,70
		10	88.527,50	88.780,80	88.826,20
		12	88.516,20	88.780,00	88.823,20
25	2	88.798,10	88.804,90	88.837,60	
	4	88.796,00	88.803,90	88.837,00	
	6	88.793,90	88.802,80	88.836,40	
	8	88.791,90	88.801,80	88.835,70	
	10	88.765,50	88.790,00	88.835,00	
	12	88.788,30	88.800,10	88.833,90	

**Tabel 5.7a Data mentah, lebar spring 2 μ m, panjang beam tether 51 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2 (51)	10	0	37.372,40	77.777,20	87.372,80
		1	37.486,90	83.110,70	88.824,40
		2	37.338,80	77.792,80	88.680,90
		3	37.435,90	77.797,90	88.658,60
		4	38.195,50	77.890,20	88.657,40
		5	46.535,00	79.058,40	88.671,20
	20	0	37.372,40	75.884,30	87.374,40
		1	37.348,30	75.899,00	88.766,90
		2	37.348,30	75.896,60	88.724,30
		3	37.449,90	75.903,90	88.705,30
		4	38.210,80	76.021,80	88.704,80
		5	46.301,60	77.450,50	88.718,60
	30	0	37.372,40	73.898,50	87.373,70
		1	37.353,10	73.910,20	88.799,20
		2	37.357,70	73.907,20	88.764,50
		3	37.463,90	73.917,50	88.748,90
		4	38.224,70	74.062,50	88.749,20
		5	45.962,00	75.726,50	88.762,80
	40	0	37.372,40	71.964,50	87.372,50
		1	37.381,40	72.921,60	88.894,60
		2	37.367,20	71.971,30	88.795,10
		3	37.477,80	71.983,80	88.782,90
		4	38.237,00	72.148,80	88.784,10
		5	45.479,50	73.951,50	88.800,70
	50	0	37.372,40	70.268,00	88.834,40
		1	37.362,60	70.275,10	88.835,00
		2	37.376,60	70.272,10	88.820,80
		3	37.491,40	70.288,80	88.812,10
		4	38.241,80	70.476,20	88.813,90
		5	44.591,20	72.260,90	88.829,60
60	0	37.372,40	68.974,10	88.833,50	
	1	37.367,30	68.979,50	88.834,40	
	2	37.385,90	68.977,50	88.834,50	
	3	37.504,10	68.998,60	88.833,40	
	4	38.224,80	69.198,40	88.835,20	
	5	42.903,80	70.626,70	88.834,60	



Grafik 5.7a Data mentah, lebar spring $2\mu\text{m}$, panjang beam tether $51\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



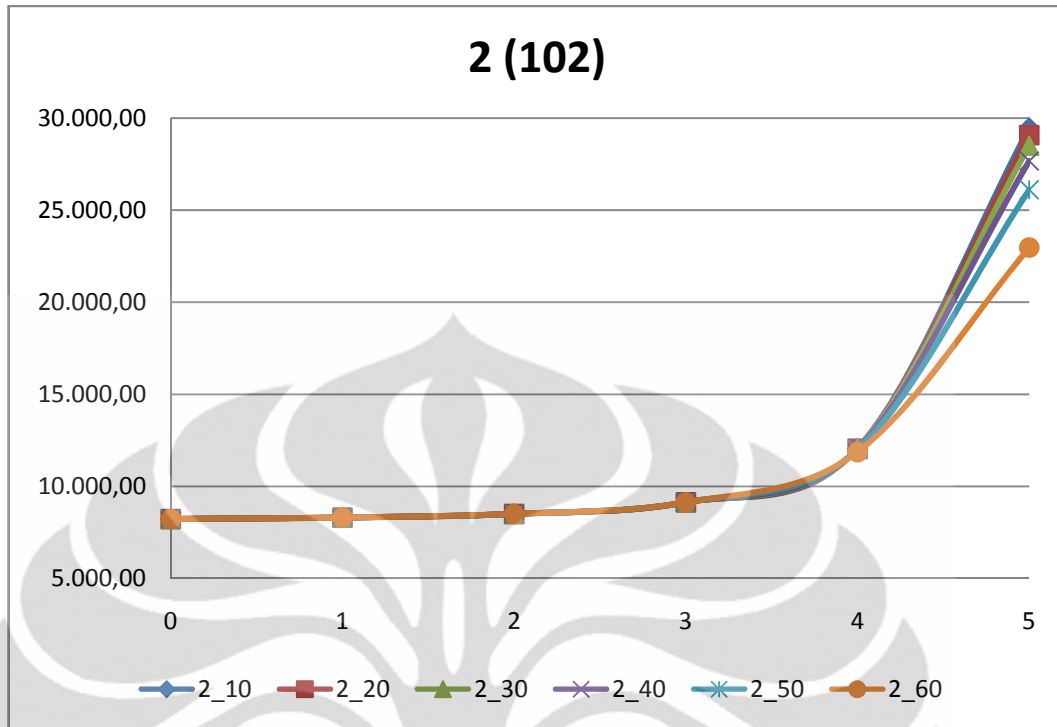
Grafik 5.7b Data olah, lebar spring $2\mu\text{m}$, panjang beam tether $51\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.7b Data olah, lebar spring 2 μ m, panjang beam tether 51 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

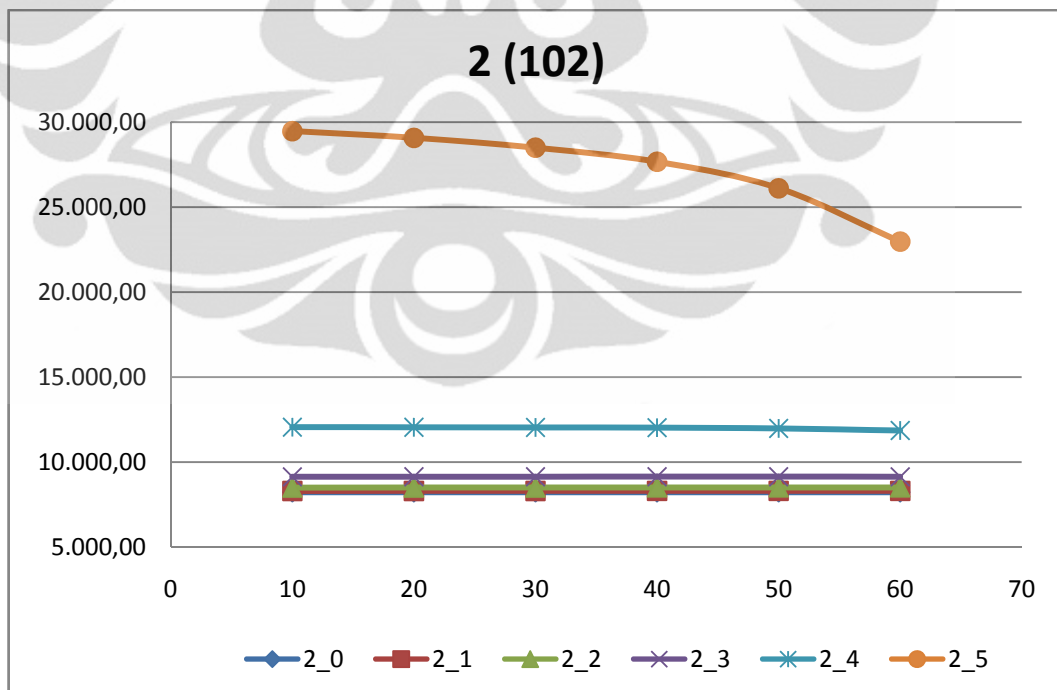
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2 (51)	0	10	37.372,40	77.777,20	87.372,80
		20	37.372,40	75.884,30	87.374,40
		30	37.372,40	73.898,50	87.373,70
		40	37.372,40	71.964,50	87.372,50
		50	37.372,40	70.268,00	88.834,40
		60	37.372,40	68.974,10	88.833,50
	1	10	37.486,90	83.110,70	88.824,40
		20	37.348,30	75.899,00	88.766,90
		30	37.353,10	73.910,20	88.799,20
		40	37.381,40	72.921,60	88.894,60
		50	37.362,60	70.275,10	88.835,00
		60	37.367,30	68.979,50	88.834,40
	2	10	37.338,80	77.792,80	88.680,90
		20	37.348,30	75.896,60	88.724,30
		30	37.357,70	73.907,20	88.764,50
		40	37.367,20	71.971,30	88.795,10
		50	37.376,60	70.272,10	88.820,80
		60	37.385,90	68.977,50	88.834,50
	3	10	37.435,90	77.797,90	88.658,60
		20	37.449,90	75.903,90	88.705,30
		30	37.463,90	73.917,50	88.748,90
		40	37.477,80	71.983,80	88.782,90
		50	37.491,40	70.288,80	88.812,10
		60	37.504,10	68.998,60	88.833,40
	4	10	38.195,50	77.890,20	88.657,40
		20	38.210,80	76.021,80	88.704,80
		30	38.224,70	74.062,50	88.749,20
		40	38.237,00	72.148,80	88.784,10
		50	38.241,80	70.476,20	88.813,90
		60	38.224,80	69.198,40	88.835,20
5	10	46.535,00	79.058,40	88.671,20	
	20	46.301,60	77.450,50	88.718,60	
	30	45.962,00	75.726,50	88.762,80	
	40	45.479,50	73.951,50	88.800,70	
	50	44.591,20	72.260,90	88.829,60	
	60	42.903,80	70.626,70	88.834,60	

**Tabel 5.8a Data mentah, lebar spring 2 μ m, panjang beam tether 102 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2 (102)	10	0	8.227,39	51.569,80	64.295,80
		1	8.302,72	51.547,20	64.322,70
		2	8.501,38	51.526,20	64.315,70
		3	9.134,45	51.516,30	64.306,00
		4	12.055,20	51.519,50	64.305,10
		5	29.476,60	51.538,60	64.321,90
	20	0	8.227,39	51.571,60	64.265,20
		1	8.303,78	51.554,60	64.295,00
		2	8.503,49	51.537,20	64.291,50
		3	9.137,29	51.528,80	64.283,80
		4	12.051,00	51.532,30	64.283,40
		5	29.081,00	51.551,20	64.229,90
	30	0	8.227,39	51.570,90	61.144,30
		1	8.304,83	51.559,30	61.150,00
		2	8.505,54	51.545,60	61.153,80
		3	9.139,77	51.538,80	61.190,90
		4	12.041,70	51.542,60	61.449,50
		5	28.503,60	51.561,10	64.279,40
	40	0	8.227,39	51.564,10	57.252,00
		1	8.305,86	51.557,80	57.255,00
		2	8.507,53	51.547,90	57.259,10
		3	9.141,88	51.542,70	57.301,90
		4	12.026,30	51.546,80	57.644,60
		5	27.674,40	51.569,50	61.221,50
	50	0	8.227,39	51.556,80	53.895,70
		1	8.306,83	51.555,60	53.896,30
		2	8.509,25	51.549,10	53.902,10
		3	9.142,07	51.545,50	53.953,50
		4	11.983,20	51.549,80	54.335,00
		5	26.114,10	51.571,30	57.809,20
60	0	8.227,39	51.357,90	51.545,60	
	1	8.307,66	51.357,40	51.549,00	
	2	8.510,20	51.365,10	51.545,90	
	3	9.136,68	51.424,10	51.543,80	
	4	11.859,80	51.548,00	51.824,40	
	5	22.974,80	51.567,50	54.568,90	



Grafik 5.8a Data mentah, lebar spring $2\mu\text{m}$, panjang beam tether $102\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



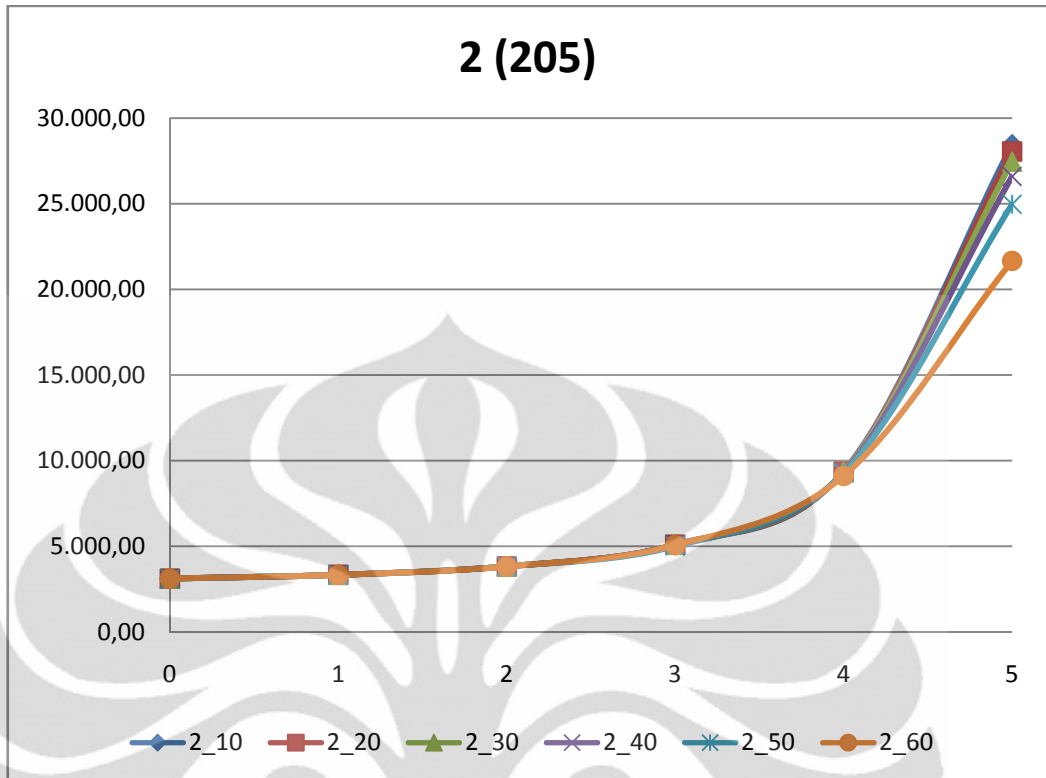
Grafik 5.8b Data olah, lebar spring $2\mu\text{m}$, panjang beam tether $102\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.8b Data olah, lebar spring 2 μ m, panjang beam tether 102 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

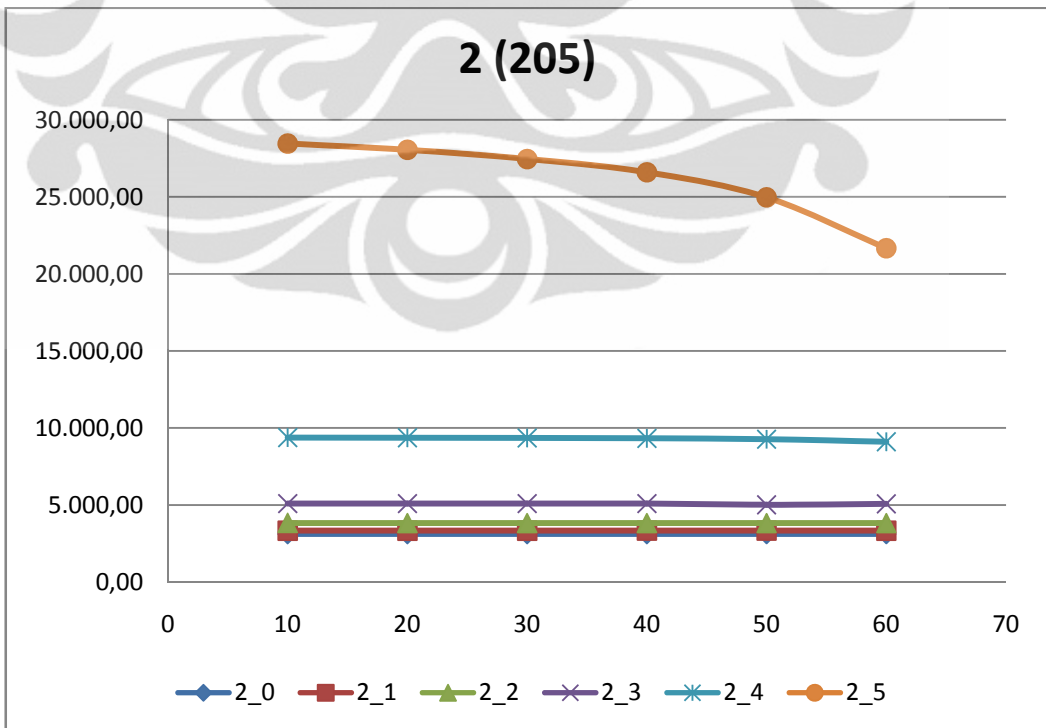
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2 (102)	0	10	8.227,39	51.569,80	64.295,80
		20	8.227,39	51.571,60	64.265,20
		30	8.227,39	51.570,90	61.144,30
		40	8.227,39	51.564,10	57.252,00
		50	8.227,39	51.556,80	53.895,70
		60	8.227,39	51.357,90	51.545,60
	1	10	8.302,72	51.547,20	64.322,70
		20	8.303,78	51.554,60	64.295,00
		30	8.304,83	51.559,30	61.150,00
		40	8.305,86	51.557,80	57.255,00
		50	8.306,83	51.555,60	53.896,30
		60	8.307,66	51.357,40	51.549,00
	2	10	8.501,38	51.526,20	64.315,70
		20	8.503,49	51.537,20	64.291,50
		30	8.505,54	51.545,60	61.153,80
		40	8.507,53	51.547,90	57.259,10
		50	8.509,25	51.549,10	53.902,10
		60	8.510,20	51.365,10	51.545,90
	3	10	9.134,45	51.516,30	64.306,00
		20	9.137,29	51.528,80	64.283,80
		30	9.139,77	51.538,80	61.190,90
		40	9.141,88	51.542,70	57.301,90
		50	9.142,07	51.545,50	53.953,50
		60	9.136,68	51.424,10	51.543,80
	4	10	12.055,20	51.519,50	64.305,10
		20	12.051,00	51.532,30	64.283,40
		30	12.041,70	51.542,60	61.449,50
		40	12.026,30	51.546,80	57.644,60
		50	11.983,20	51.549,80	54.335,00
		60	11.859,80	51.548,00	51.824,40
5	10	29.476,60	51.538,60	64.321,90	
	20	29.081,00	51.551,20	64.229,90	
	30	28.503,60	51.561,10	64.279,40	
	40	27.674,40	51.569,50	61.221,50	
	50	26.114,10	51.571,30	57.809,20	
	60	22.974,80	51.567,50	54.568,90	

**Tabel 5.9a Data mentah, lebar spring 2 μ m, panjang beam tether 205 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2 (205)	10	0	3.113,07	34.889,70	41.425,60
		1	3.332,09	34.887,00	41.432,60
		2	3.828,13	34.924,90	41.532,90
		3	5.091,35	34.870,40	41.490,20
		4	9.374,18	34.876,70	41.519,80
		5	28.466,60	34.903,00	41.534,50
	20	0	3.113,07	34.873,40	41.257,70
		1	3.332,46	34.878,10	41.264,70
		2	3.822,62	34.933,00	41.304,50
		3	5.092,05	34.860,80	41.319,90
		4	9.365,86	34.867,20	41.348,40
		5	28.056,60	34.893,10	41.362,40
	30	0	3.113,07	34.857,80	41.116,50
		1	3.332,79	34.861,90	41.123,30
		2	3.823,04	34.855,60	41.145,00
		3	5.092,10	34.851,70	41.175,60
		4	9.350,80	34.858,20	41.203,00
		5	27.457,50	34.883,60	41.216,30
	40	0	3.113,07	34.841,50	40.740,80
		1	3.333,08	34.848,50	40.749,20
		2	3.823,53	34.844,60	40.767,40
		3	5.091,49	34.841,80	40.835,10
		4	9.327,94	34.848,50	41.082,90
		5	26.597,70	34.879,60	41.095,30
	50	0	3.113,07	34.824,10	36.758,20
		1	3.333,22	34.833,80	36.765,40
		2	3.823,39	34.832,00	36.786,00
		3	5.015,16	42.047,90	46.476,30
		4	9.269,07	34.836,70	37.338,50
		5	24.971,00	34.866,30	41.000,10
60	0	3.113,07	33.619,30	34.804,40	
	1	3.332,96	33.625,80	34.815,90	
	2	3.821,46	33.648,90	34.816,10	
	3	5.072,99	33.739,60	34.815,10	
	4	9.105,21	34.251,10	34.821,20	
	5	21.668,90	34.847,90	37.563,10	



Grafik 5.9a Data mentah, lebar spring $2\mu\text{m}$, panjang beam tether $205\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



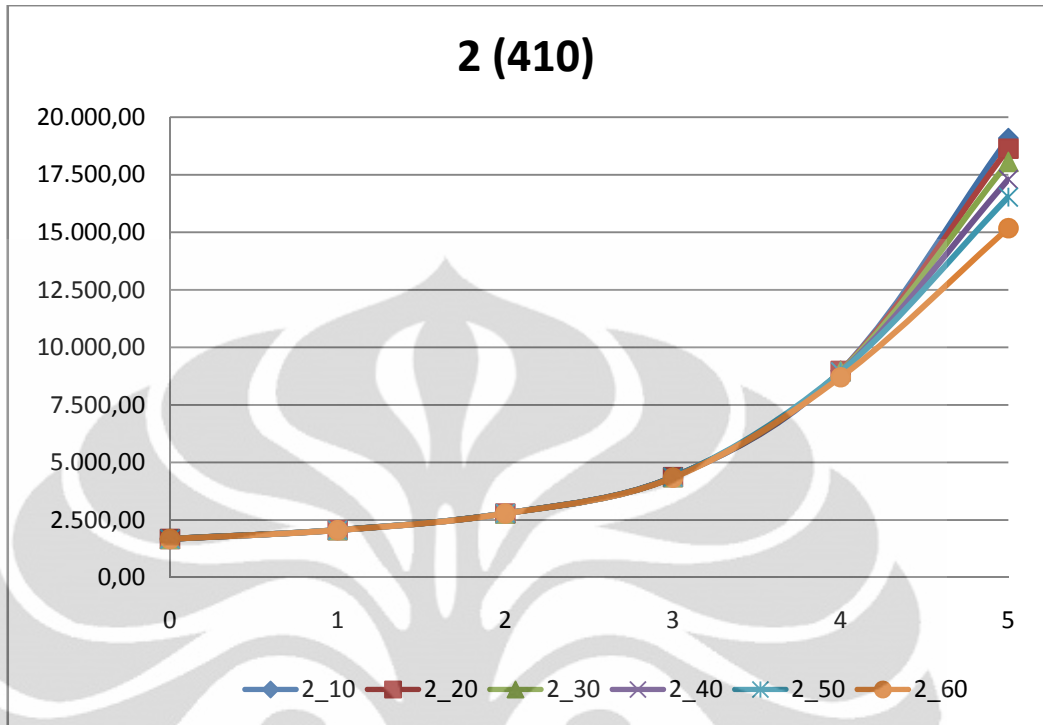
Grafik 5.9b Data mentah, lebar spring $2\mu\text{m}$, panjang beam tether $205\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.9b Data mentah, lebar spring 2 μ m, panjang beam tether 205 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

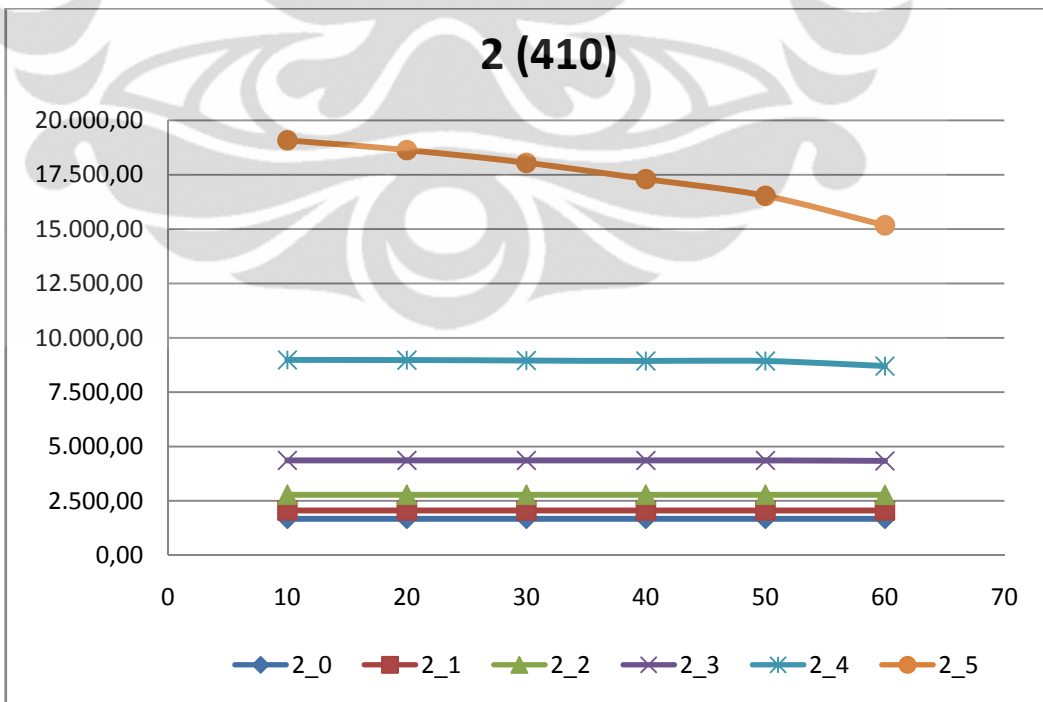
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2 (205)	0	10	3.113,07	34.889,70	41.425,60
		20	3.113,07	34.873,40	41.257,70
		30	3.113,07	34.857,80	41.116,50
		40	3.113,07	34.841,50	40.740,80
		50	3.113,07	34.824,10	36.758,20
		60	3.113,07	33.619,30	34.804,40
	1	10	3.332,09	34.887,00	41.432,60
		20	3.332,46	34.878,10	41.264,70
		30	3.332,79	34.861,90	41.123,30
		40	3.333,08	34.848,50	40.749,20
		50	3.333,22	34.833,80	36.765,40
		60	3.332,96	33.625,80	34.815,90
	2	10	3.828,13	34.924,90	41.532,90
		20	3.822,62	34.933,00	41.304,50
		30	3.823,04	34.855,60	41.145,00
		40	3.823,53	34.844,60	40.767,40
		50	3.823,39	34.832,00	36.786,00
		60	3.821,46	33.648,90	34.816,10
	3	10	5.091,35	34.870,40	41.490,20
		20	5.092,05	34.860,80	41.319,90
		30	5.092,10	34.851,70	41.175,60
		40	5.091,49	34.841,80	40.835,10
		50	5.015,16	42.047,90	46.476,30
		60	5.072,99	33.739,60	34.815,10
	4	10	9.374,18	34.876,70	41.519,80
		20	9.365,86	34.867,20	41.348,40
		30	9.350,80	34.858,20	41.203,00
		40	9.327,94	34.848,50	41.082,90
		50	9.269,07	34.836,70	37.338,50
		60	9.105,21	34.251,10	34.821,20
5	10	28.466,60	34.903,00	41.534,50	
	20	28.056,60	34.893,10	41.362,40	
	30	27.457,50	34.883,60	41.216,30	
	40	26.597,70	34.879,60	41.095,30	
	50	24.971,00	34.866,30	41.000,10	
	60	21.668,90	34.847,90	37.563,10	

**Tabel 5.10a Data mentah, lebar spring 2 μ m, panjang beam tether 410 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2 (410)	10	0	1.676,25	18.738,00	20.862,80
		1	2.058,25	18.740,70	20.877,90
		2	2.783,22	18.745,00	20.926,10
		3	4.363,52	18.752,10	20.990,80
		4	8.985,17	18.784,10	20.996,90
		5	19.088,40	20.997,10	21.050,20
	20	0	1.676,25	18.116,80	20.534,40
		1	2.058,40	18.120,20	20.549,20
		2	2.783,56	18.125,20	20.595,20
		3	4.363,72	18.136,10	20.658,30
		4	8.976,15	18.185,40	20.714,00
		5	18.634,40	20.741,00	20.997,70
	30	0	1.676,26	17.285,40	20.255,30
		1	2.058,50	17.288,60	20.269,50
		2	2.783,77	17.295,40	20.312,80
		3	4.363,31	17.312,50	20.373,70
		4	8.960,13	17.388,90	20.427,50
		5	18.051,80	20.453,50	20.996,90
	40	0	1.676,25	16.197,80	20.026,10
		1	2.058,52	16.202,60	20.039,80
		2	2.783,78	16.811,40	20.079,60
		3	4.361,82	16.235,00	20.136,90
		4	8.935,88	16.352,50	20.188,70
		5	17.302,30	20.213,50	20.994,60
	50	0	1.676,25	16.197,80	20.026,10
		1	2.058,31	14.887,10	19.863,20
		2	2.783,78	16.211,40	20.079,60
		3	4.361,82	16.235,00	20.136,90
		4	8.935,88	16.352,50	20.188,70
		5	16.531,89	20.213,30	20.994,60
60	0	1.676,25	13.516,30	19.728,70	
	1	2.057,45	13.522,80	19.739,70	
	2	2.779,64	13.538,70	19.767,20	
	3	4.339,02	13.588,10	19.809,90	
	4	8.703,41	13.834,60	19.853,80	
	5	15.180,00	19.877,80	20.635,70	



Grafik 5.10a Data mentah, lebar spring $2\mu\text{m}$, panjang beam tether $410\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



Grafik 5.10b Data olah, lebar spring $2\mu\text{m}$, panjang beam tether $410\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.10a Data olah, lebar spring 2 μ m, panjang beam tether 410 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

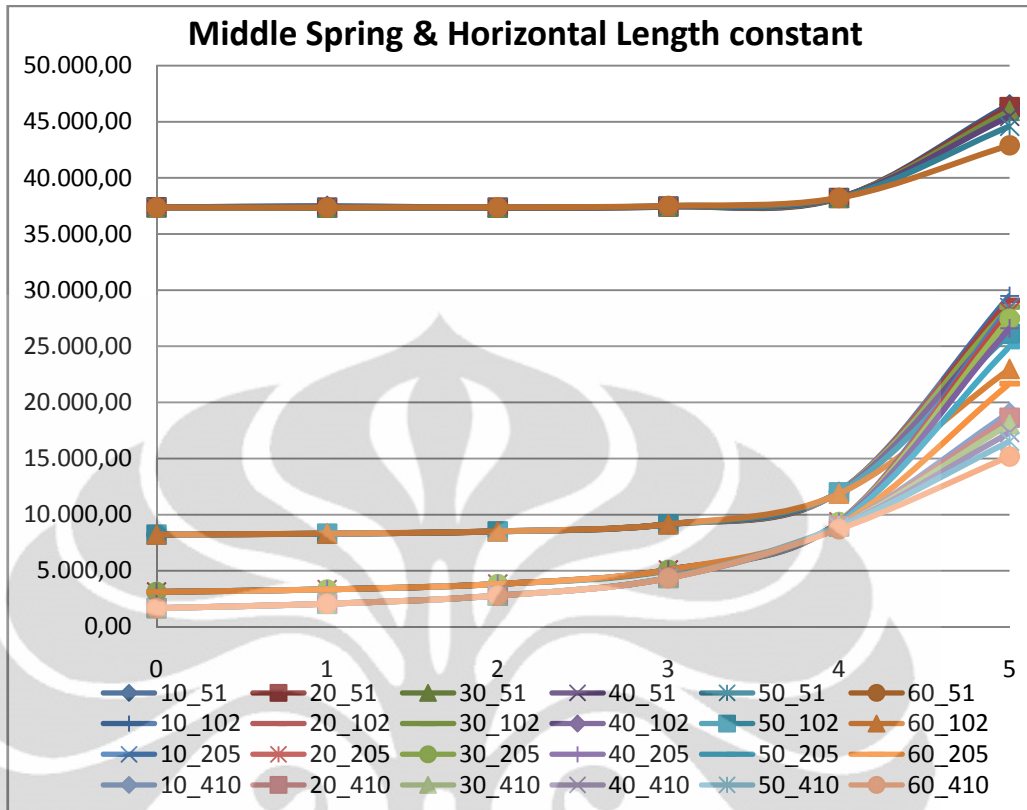
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
2 (410)	0	10	1.676,25	18.738,00	20.862,80
		20	1.676,25	18.116,80	20.534,40
		30	1.676,26	17.285,40	20.255,30
		40	1.676,25	16.197,80	20.026,10
		50	1.676,25	16.197,80	20.026,10
		60	1.676,25	13.516,30	19.728,70
	1	10	2.058,25	18.740,70	20.877,90
		20	2.058,40	18.120,20	20.549,20
		30	2.058,50	17.288,60	20.269,50
		40	2.058,52	16.202,60	20.039,80
		50	2.058,31	14.887,10	19.863,20
		60	2.057,45	13.522,80	19.739,70
	2	10	2.783,22	18.745,00	20.926,10
		20	2.783,56	18.125,20	20.595,20
		30	2.783,77	17.295,40	20.312,80
		40	2.783,78	16.811,40	20.079,60
		50	2.783,78	16.211,40	20.079,60
		60	2.779,64	13.538,70	19.767,20
	3	10	4.363,52	18.752,10	20.990,80
		20	4.363,72	18.136,10	20.658,30
		30	4.363,31	17.312,50	20.373,70
		40	4.361,82	16.235,00	20.136,90
		50	4.361,82	16.235,00	20.136,90
		60	4.339,02	13.588,10	19.809,90
	4	10	8.985,17	18.784,10	20.996,90
		20	8.976,15	18.185,40	20.714,00
		30	8.960,13	17.388,90	20.427,50
		40	8.935,88	16.352,50	20.188,70
		50	8.935,88	16.352,50	20.188,70
		60	8.703,41	13.834,60	19.853,80
5	10	19.088,40	20.997,10	21.050,20	
	20	18.634,40	20.741,00	20.997,70	
	30	18.051,80	20.453,50	20.996,90	
	40	17.302,30	20.213,50	20.994,60	
	50	16.531,89	20.213,30	20.994,60	
	60	15.180,00	19.877,80	20.635,70	

**Tabel 5.11a Data mentah rekap 2 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

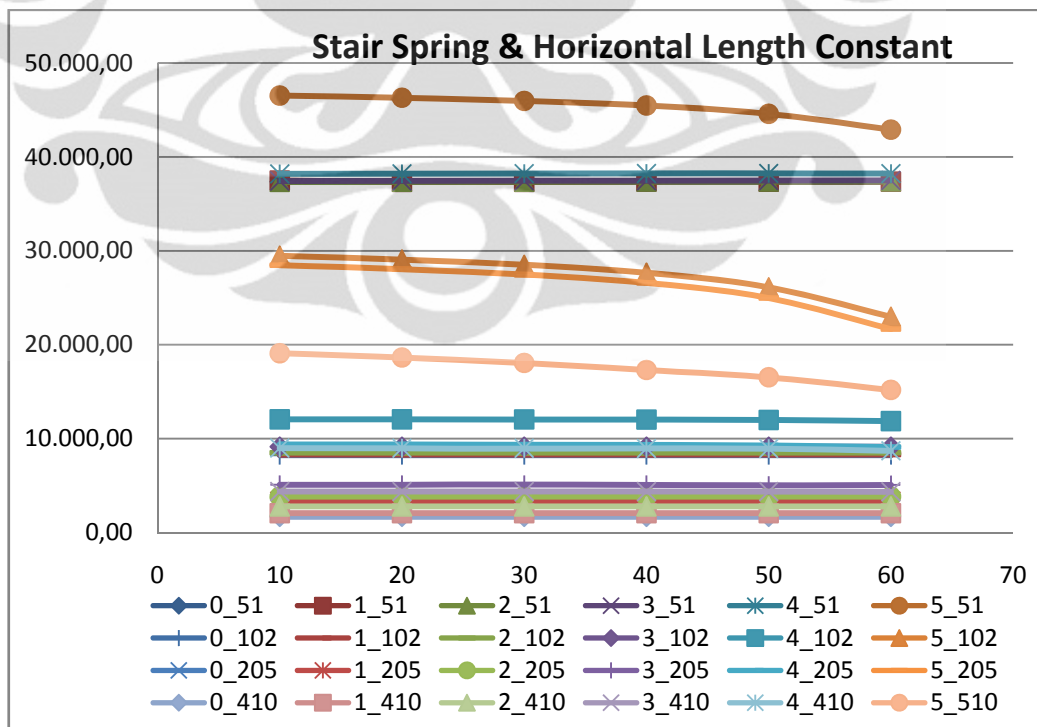
width	Middle spring	Stair spring	fnatural (mode 1)			
			51,00	102,00	205,00	410,00
2	10	0	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25
		1	37.486,90	8.302,72	3.332,09	2.058,25
		2	37.338,80	8.501,38	3.828,13	2.783,22
		3	37.435,90	9.134,45	5.091,35	4.363,52
		4	38.195,50	12.055,20	9.374,18	8.985,17
		5	46.535,00	29.476,60	28.466,60	19.088,40
	20	0	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25
		1	37.348,30	8.303,78	3.332,46	2.058,40
		2	37.348,30	8.503,49	3.822,62	2.783,56
		3	37.449,90	9.137,29	5.092,05	4.363,72
		4	38.210,80	12.051,00	9.365,86	8.976,15
		5	46.301,60	29.081,00	28.056,60	18.634,40
	30	0	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,26
		1	37.353,10	8.304,83	3.332,79	2.058,50
		2	37.357,70	8.505,54	3.823,04	2.783,77
		3	37.463,90	9.139,77	5.092,10	4.363,31
		4	38.224,70	12.041,70	9.350,80	8.960,13
		5	45.962,00	28.503,60	27.457,50	18.051,80
	40	0	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25
		1	37.381,40	8.305,86	3.333,08	2.058,52
		2	37.367,20	8.507,53	3.823,53	2.783,78
		3	37.477,80	9.141,88	5.091,49	4.361,82
		4	38.237,00	12.026,30	9.327,94	8.935,88
		5	45.479,50	27.674,40	26.597,70	17.302,30
	50	0	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25
		1	37.362,60	8.306,83	3.333,22	2.058,31
		2	37.376,60	8.509,25	3.823,39	2.783,78
		3	37.491,40	9.142,07	5.015,16	4.361,82
		4	38.241,80	11.983,20	9.269,07	8.935,88
		5	44.591,20	26.114,10	24.971,00	16.531,89
60	0	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25	
	1	37.367,30	8.307,66	3.332,96	2.057,45	
	2	37.385,90	8.510,20	3.821,46	2.779,64	
	3	37.504,10	9.136,68	5.072,99	4.339,02	
	4	38.224,80	11.859,80	9.105,21	8.703,41	
	5	42.903,80	22.974,80	21.668,90	15.180,00	

**Tabel 5.11b Data olah rekap 2 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

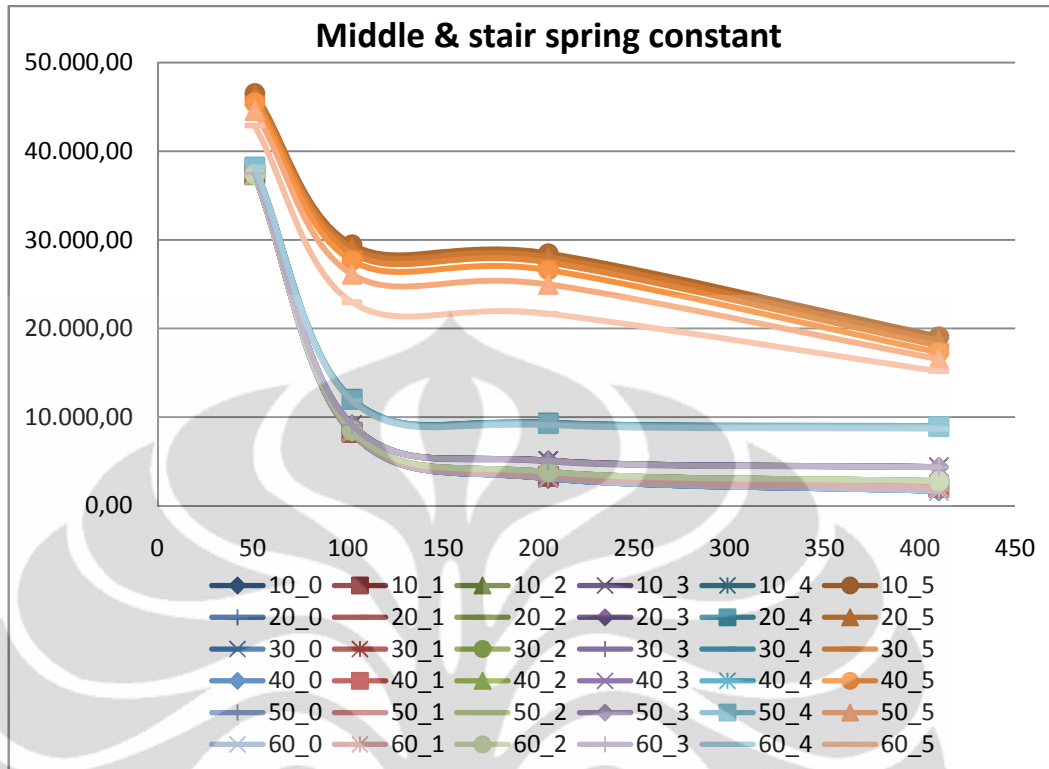
width	Stair Spring	Middle Spring	fnatural (mode 1)			
			51,00	102,00	205,00	410,00
2	0	10	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25
		20	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25
		30	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,26
		40	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25
		50	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25
		60	37.372,40	8.227,39	3.113,07	1.676,25
	1	10	37.486,90	8.302,72	3.332,09	2.058,25
		20	37.348,30	8.303,78	3.332,46	2.058,40
		30	37.353,10	8.304,83	3.332,79	2.058,50
		40	37.381,40	8.305,86	3.333,08	2.058,52
		50	37.362,60	8.306,83	3.333,22	2.058,31
		60	37.367,30	8.307,66	3.332,96	2.057,45
	2	10	37.338,80	8.501,38	3.828,13	2.783,22
		20	37.348,30	8.503,49	3.822,62	2.783,56
		30	37.357,70	8.505,54	3.823,04	2.783,77
		40	37.367,20	8.507,53	3.823,53	2.783,78
		50	37.376,60	8.509,25	3.823,39	2.783,78
		60	37.385,90	8.510,20	3.821,46	2.779,64
	3	10	37.435,90	9.134,45	5.091,35	4.363,52
		20	37.449,90	9.137,29	5.092,05	4.363,72
		30	37.463,90	9.139,77	5.092,10	4.363,31
		40	37.477,80	9.141,88	5.091,49	4.361,82
		50	37.491,40	9.142,07	5.015,16	4.361,82
		60	37.504,10	9.136,68	5.072,99	4.339,02
4	10	38.195,50	12.055,20	9.374,18	8.985,17	
	20	38.210,80	12.051,00	9.365,86	8.976,15	
	30	38.224,70	12.041,70	9.350,80	8.960,13	
	40	38.237,00	12.026,30	9.327,94	8.935,88	
	50	38.241,80	11.983,20	9.269,07	8.935,88	
	60	38.224,80	11.859,80	9.105,21	8.703,41	
5	10	46.535,00	29.476,60	28.466,60	19.088,40	
	20	46.301,60	29.081,00	28.056,60	18.634,40	
	30	45.962,00	28.503,60	27.457,50	18.051,80	
	40	45.479,50	27.674,40	26.597,70	17.302,30	
	50	44.591,20	26.114,10	24.971,00	16.531,89	
	60	42.903,80	22.974,80	21.668,90	15.180,00	



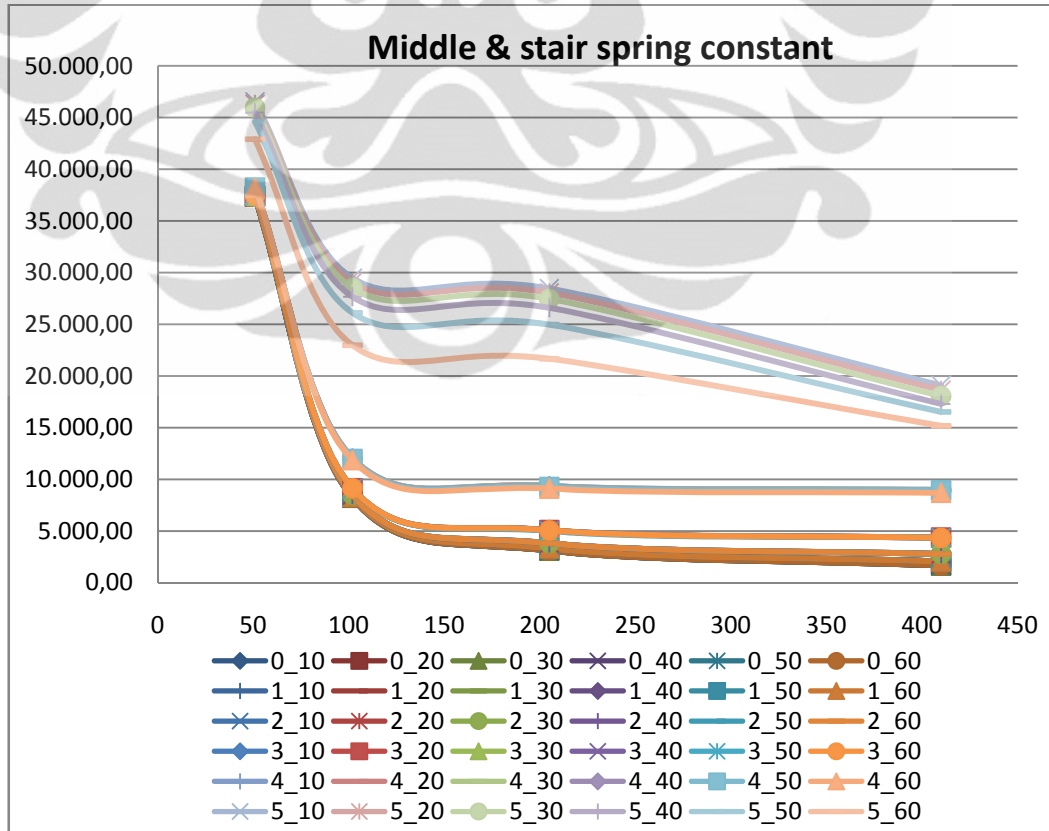
Grafik 5.11a Data rekap 2 μ m (1)



Grafik 5.11b Data rekap 2 μ m (2)



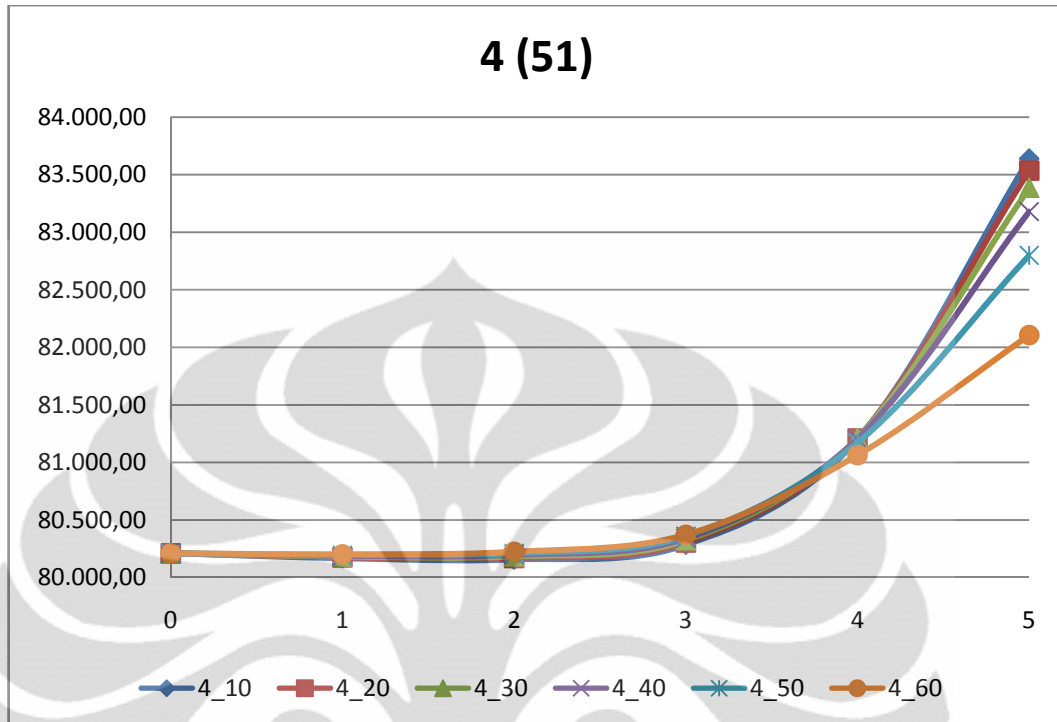
Grafik 5.11c Data rekap 2 μ m (3)



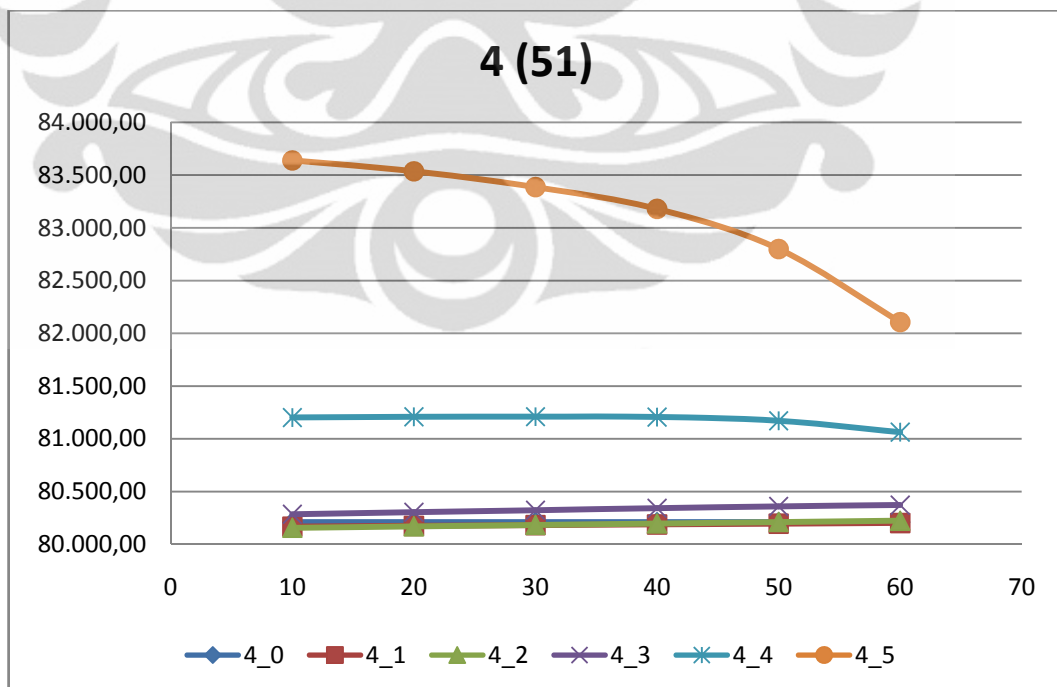
Grafik 5.11d Data rekap 2 μ m (4)

**Tabel 5.12a Data mentah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 51 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4 (51)	10	0	80.210,00	87.312,20	88.807,50
		1	80.167,70	87.312,40	88.811,60
		2	80.155,80	87.313,50	88.813,90
		3	80.284,80	87.316,60	88.813,00
		4	81.202,00	87.337,20	88.813,90
		5	83.639,90	87.410,60	88.811,20
	20	0	80.210,00	87.230,40	88.815,50
		1	80.174,60	87.230,80	88.816,40
		2	80.169,50	87.231,60	88.811,70
		3	80.304,10	87.234,90	88.815,30
		4	81.209,30	87.257,80	88.811,50
		5	83.536,40	87.333,80	88.813,90
	30	0	80.210,00	87.154,00	88.809,50
		1	80.181,50	87.155,00	88.808,30
		2	80.183,20	87.155,70	88.809,90
		3	80.323,20	87.159,40	88.809,60
		4	81.210,30	87.183,80	88.808,80
		5	83.386,60	87.259,30	88.807,80
	40	0	80.210,00	87.087,00	88.804,10
		1	80.188,30	87.087,50	88.803,20
		2	80.196,80	87.088,10	88.804,50
		3	80.342,00	87.091,90	88.802,90
		4	81.206,60	87.115,90	88.803,20
		5	83.180,20	87.189,00	88.802,40
	50	0	80.210,00	87.033,30	88.833,40
		1	80.195,20	87.033,30	88.833,10
		2	80.210,30	87.033,90	88.833,10
		3	80.359,10	87.038,20	88.833,10
		4	81.171,60	87.062,70	88.833,20
		5	82.800,20	87.123,50	88.833,00
60	0	80.210,00	86.994,00	88.832,80	
	1	80.202,00	86.994,20	88.832,80	
	2	80.223,50	86.995,00	88.832,60	
	3	80.372,00	86.399,10	88.831,90	
	4	81.063,70	87.020,90	88.833,30	
	5	82.106,90	87.059,10	88.832,50	



Grafik 5.12a Data mentah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 51 μ m (variasi middle spring dan stair spring)



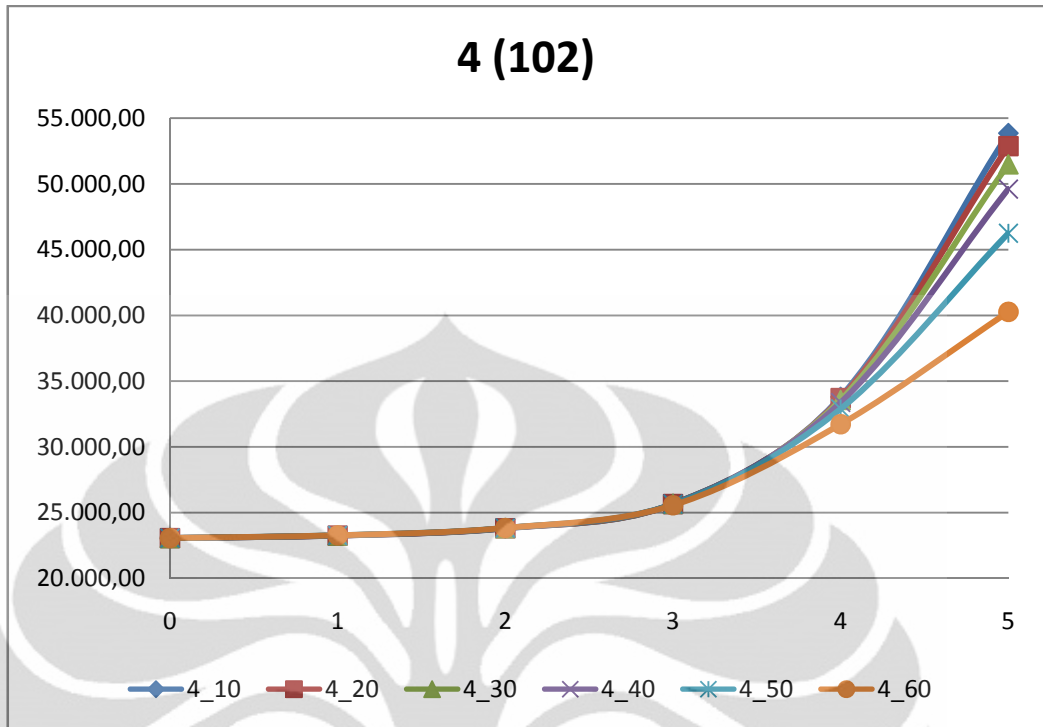
Grafik 5.12b Data olah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 51 μ m (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.12b Data olah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 51 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

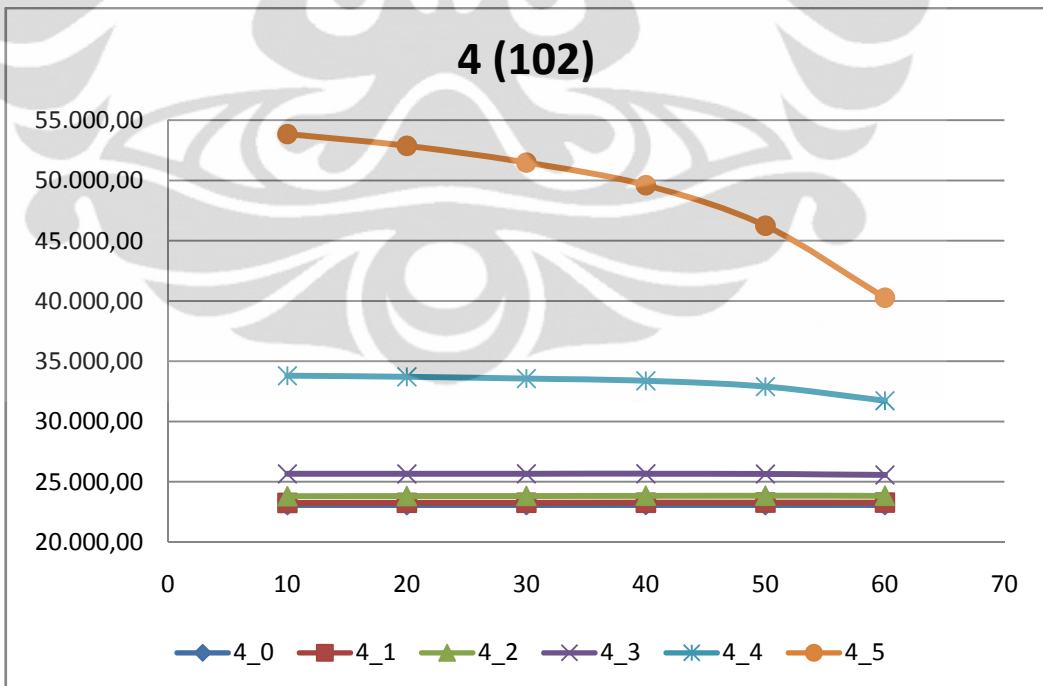
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4 (51)	0	10	80.210,00	87.312,20	88.807,50
		20	80.210,00	87.230,40	88.815,50
		30	80.210,00	87.154,00	88.809,50
		40	80.210,00	87.087,00	88.804,10
		50	80.210,00	87.033,30	88.333,40
		60	80.210,00	86.994,00	88.832,80
	1	10	80.167,70	87.312,40	88.811,60
		20	80.174,60	87.230,80	88.816,40
		30	80.181,50	87.155,00	88.808,30
		40	80.188,30	87.087,50	88.803,20
		50	80.195,20	87.033,30	88.833,10
		60	80.202,00	86.994,20	88.832,80
	2	10	80.155,80	87.313,50	88.813,90
		20	80.169,50	87.231,60	88.811,70
		30	80.183,20	87.155,70	88.809,90
		40	80.196,80	87.088,10	88.804,50
		50	80.210,30	87.033,90	88.833,10
		60	80.223,50	86.995,00	88.832,60
	3	10	80.284,80	87.316,60	88.813,00
		20	80.304,10	87.234,90	88.815,30
		30	80.323,20	87.159,40	88.809,60
		40	80.342,00	87.091,90	88.802,90
		50	80.359,10	87.038,20	88.833,10
		60	80.372,00	86.399,10	88.831,90
	4	10	81.202,00	87.337,20	88.813,90
		20	81.209,30	87.257,80	88.811,50
		30	81.210,30	87.183,80	88.808,80
		40	81.206,60	87.115,90	88.803,20
		50	81.171,60	87.062,70	88.833,20
		60	81.063,70	87.020,90	88.833,30
5	10	83.639,90	87.410,60	88.811,20	
	20	83.536,40	87.333,80	88.813,90	
	30	83.386,60	87.259,30	88.807,80	
	40	83.180,20	87.189,00	88.802,40	
	50	82.800,20	87.123,50	88.833,00	
	60	82.106,90	87.059,10	88.832,50	

**Tabel 5.13a Data mentah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 102 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4 (102)	10	0	23.069,00	85.698,80	86.210,30
		1	23.252,60	85.700,60	86.116,80
		2	23.801,60	85.704,30	86.033,60
		3	25.663,60	85.731,70	86.224,80
		4	33.802,50	85.803,20	86.006,10
		5	53.854,60	86.061,00	86.085,60
	20	0	23.069,00	85.337,90	86.233,90
		1	23.258,30	85.339,50	86.159,00
		2	23.812,50	85.343,60	86.089,50
		3	25.658,90	85.360,70	86.059,10
		4	33.715,20	85.463,10	86.068,70
		5	52.876,10	85.788,30	86.122,40
	30	0	23.069,00	84.965,10	86.247,10
		1	23.263,90	84.966,50	86.191,40
		2	23.822,70	84.970,90	86.135,70
		3	25.665,20	84.991,50	86.111,00
		4	33.570,70	85.112,70	86.121,30
		5	51.488,30	85.472,80	86.173,30
	40	0	23.076,10	84.641,50	88.866,00
		1	23.269,20	84.599,70	86.164,10
		2	23.832,40	84.603,90	86.122,80
		3	25.668,30	84.626,50	86.104,10
		4	33.379,10	84.760,50	86.115,60
		5	49.612,00	85.138,30	86.180,10
	50	0	23.068,90	84.278,40	86.190,80
		1	23.274,10	84.278,90	86.170,60
		2	23.839,10	84.283,90	86.143,00
		3	25.648,60	84.309,70	86.130,00
		4	32.898,10	84.455,30	86.141,50
		5	46.248,80	84.800,40	86.200,60
60	0	23.068,90	84.032,60	86.165,50	
	1	23.277,70	84.032,90	86.161,00	
	2	23.838,00	84.038,40	86.146,40	
	3	25.567,20	84.067,30	86.139,40	
	4	31.729,60	84.204,30	86.149,50	
	5	40.271,50	84.435,10	86.199,50	



Grafik 5.13a Data mentah, lebar spring $4\mu\text{m}$, panjang beam tether $102\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



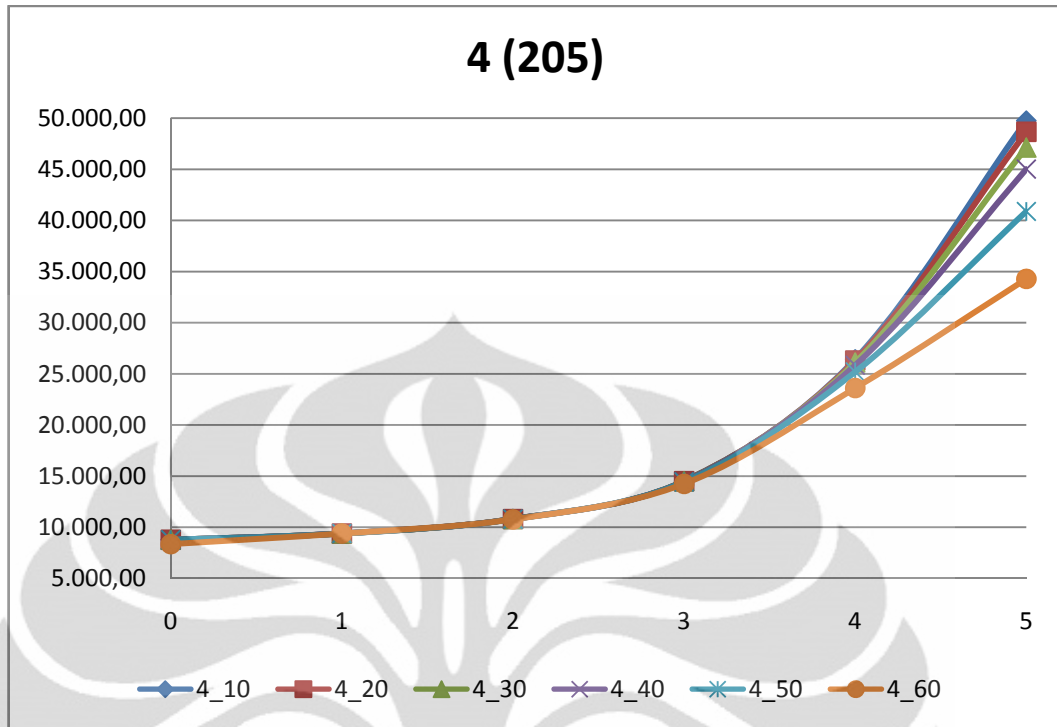
Grafik 5.13b Data olah, lebar spring $4\mu\text{m}$, panjang beam tether $102\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.13b Data olah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 102 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

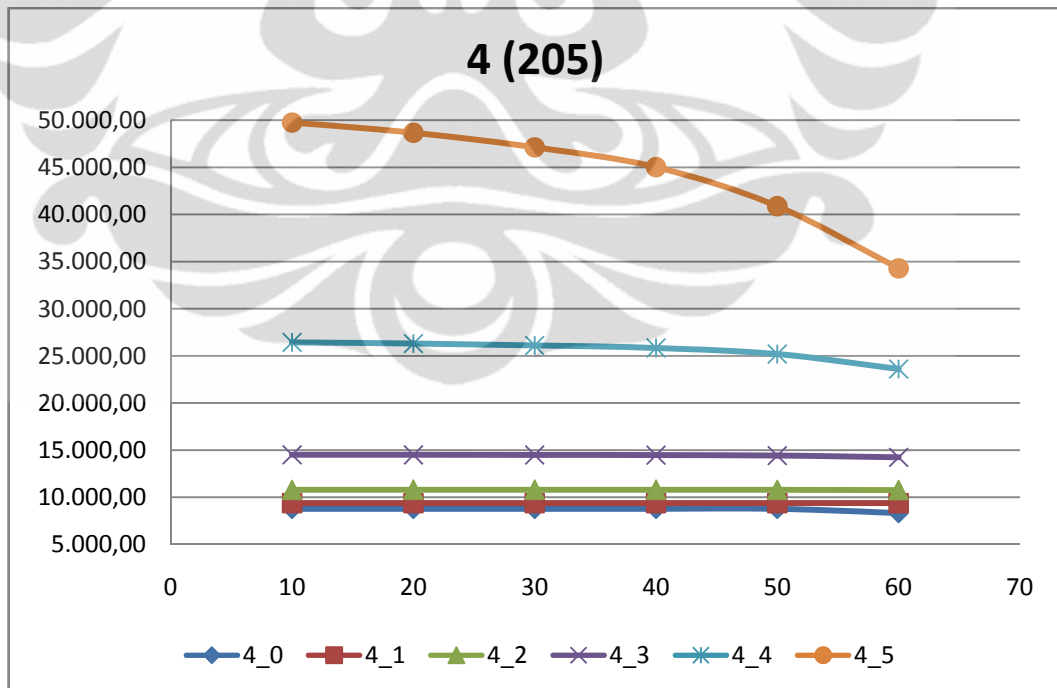
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4 (102)	0	10	23.069,00	85.698,80	86.210,30
		20	23.069,00	85.337,90	86.233,90
		30	23.069,00	84.965,10	86.247,10
		40	23.076,10	84.641,50	88.866,00
		50	23.068,90	84.278,40	86.190,80
		60	23.068,90	84.032,60	86.165,50
	1	10	23.252,60	85.700,60	86.116,80
		20	23.258,30	85.339,50	86.159,00
		30	23.263,90	84.966,50	86.191,40
		40	23.269,20	84.599,70	86.164,10
		50	23.274,10	84.278,90	86.170,60
		60	23.277,70	84.032,90	86.161,00
	2	10	23.801,60	85.704,30	86.033,60
		20	23.812,50	85.343,60	86.089,50
		30	23.822,70	84.970,90	86.135,70
		40	23.832,40	84.603,90	86.122,80
		50	23.839,10	84.283,90	86.143,00
		60	23.838,00	84.038,40	86.146,40
	3	10	25.663,60	85.731,70	86.224,80
		20	25.658,90	85.360,70	86.059,10
		30	25.665,20	84.991,50	86.111,00
		40	25.668,30	84.626,50	86.104,10
		50	25.648,60	84.309,70	86.130,00
		60	25.567,20	84.067,30	86.139,40
	4	10	33.802,50	85.803,20	86.006,10
		20	33.715,20	85.463,10	86.068,70
		30	33.570,70	85.112,70	86.121,30
		40	33.379,10	84.760,50	86.115,60
		50	32.898,10	84.455,30	86.141,50
		60	31.729,60	84.204,30	86.149,50
5	10	53.854,60	86.061,00	86.085,60	
	20	52.876,10	85.788,30	86.122,40	
	30	51.488,30	85.472,80	86.173,30	
	40	49.612,00	85.138,30	86.180,10	
	50	46.248,80	84.800,40	86.200,60	
	60	40.271,50	84.435,10	86.199,50	

**Tabel 5.14a Data mentah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 205 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4 (205)	10	0	8.782,19	55.830,50	75.661,70
		1	9.392,89	55.806,50	75.679,70
		2	10.803,30	55.767,30	75.729,30
		3	14.520,40	56.124,80	76.318,70
		4	26.443,50	55.766,30	75.857,20
		5	49.754,60	55.835,40	75.883,60
	20	0	8.782,19	55.804,00	75.480,30
		1	9.394,52	55.790,30	75.497,70
		2	10.808,00	55.762,10	75.558,60
		3	14.515,40	56.099,20	76.004,30
		4	26.315,80	55.760,70	75.664,60
		5	48.668,40	55.828,00	75.689,20
	30	0	8.782,19	55.775,90	75.328,80
		1	9.395,80	5.572,10	75.345,30
		2	10.808,20	56.144,30	75.568,90
		3	14.501,70	55.735,60	75.447,20
		4	26.113,10	55.752,70	75.499,90
		5	47.124,00	55.817,70	75.522,70
	40	0	8.782,05	55.686,90	72.818,70
		1	9.396,51	55.691,20	72.829,30
		2	10.806,70	55.674,50	72.869,20
		3	14.483,10	55.665,80	73.042,90
		4	25.847,60	55.683,50	74.004,60
		5	45.025,50	55.763,80	75.380,80
	50	0	8.783,57	56.072,00	70.518,50
		1	9.395,90	55.661,50	70.486,40
		2	10.799,60	55.651,50	70.533,30
		3	14.436,30	55.847,70	70.779,20
		4	25.199,20	55.662,40	71.793,00
		5	40.886,80	55.736,20	74.262,50
60	0	8.351,24	49.081,60	65.333,00	
	1	9.391,76	55.620,70	68.687,40	
	2	10.773,60	55.616,90	68.740,80	
	3	14.249,20	55.935,50	68.974,50	
	4	23.615,70	55.628,10	69.551,00	
	5	34.291,10	55.690,30	71.613,80	



Grafik 5.14a Data mentah, lebar spring $4\mu\text{m}$, panjang beam tether $205\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



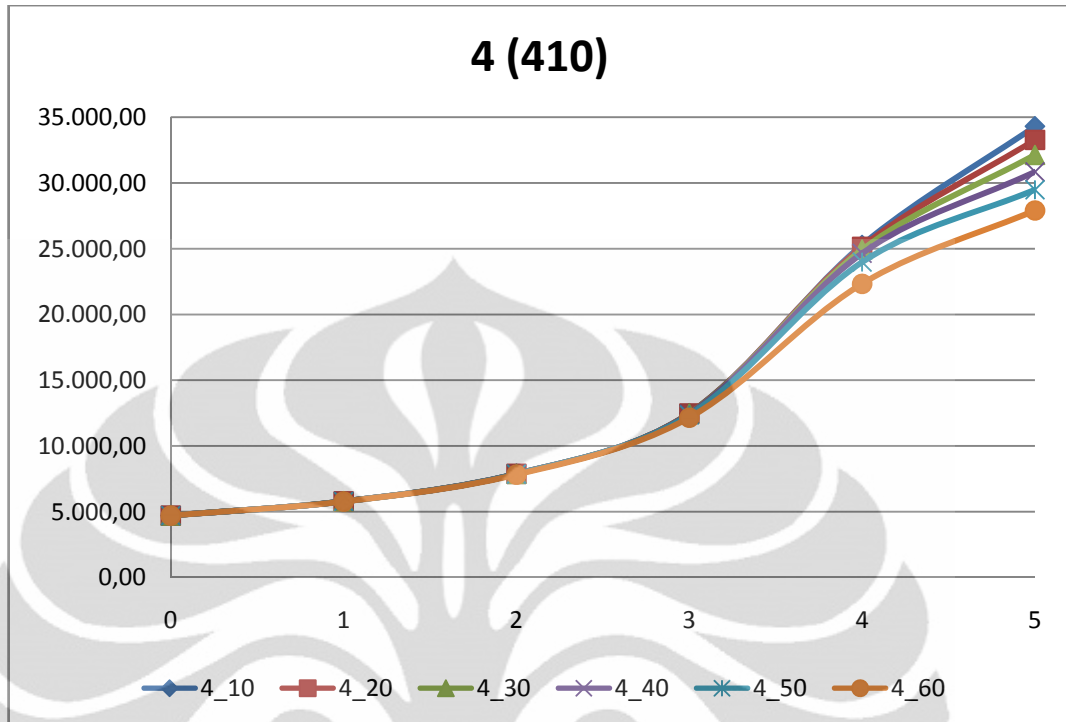
Grafik 5.14b Data olah, lebar spring $4\mu\text{m}$, panjang beam tether $205\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.14b Data olah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 205 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

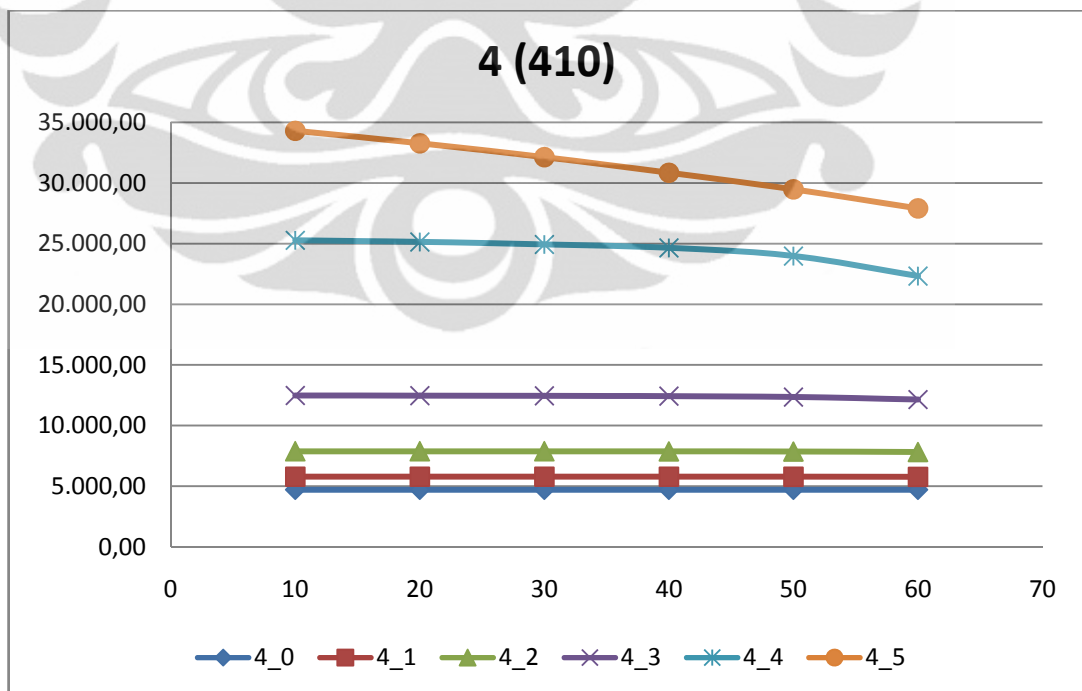
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4 (205)	0	10	8.782,19	55.830,50	75.661,70
		20	8.782,19	55.804,00	75.480,30
		30	8.782,19	55.775,90	75.328,80
		40	8.782,05	55.686,90	72.818,70
		50	8.783,57	56.072,00	70.518,50
		60	8.351,24	49.081,60	65.333,00
	1	10	9.392,89	55.806,50	75.679,70
		20	9.394,52	55.790,30	75.497,70
		30	9.395,80	55.572,10	75.345,30
		40	9.396,51	55.691,20	72.829,30
		50	9.395,90	55.661,50	70.486,40
		60	9.391,76	55.620,70	68.687,40
	2	10	10.803,30	55.767,30	75.729,30
		20	10.808,00	55.762,10	75.558,60
		30	10.808,20	56.144,30	75.568,90
		40	10.806,70	55.674,50	72.869,20
		50	10.799,60	55.651,50	70.533,30
		60	10.773,60	55.616,90	68.740,80
	3	10	14.520,40	56.124,80	76.318,70
		20	14.515,40	56.099,20	76.004,30
		30	14.501,70	55.735,60	75.447,20
		40	14.483,10	55.665,80	73.042,90
		50	14.436,30	55.847,70	70.779,20
		60	14.249,20	55.935,50	68.974,50
4	10	26.443,50	55.766,30	75.857,20	
	20	26.315,80	55.760,70	75.664,60	
	30	26.113,10	55.752,70	75.499,90	
	40	25.847,60	55.683,50	74.004,60	
	50	25.199,20	55.662,40	71.793,00	
	60	23.615,70	55.628,10	69.551,00	
5	10	49.754,60	55.835,40	75.883,60	
	20	48.668,40	55.828,00	75.689,20	
	30	47.124,00	55.817,70	75.522,70	
	40	45.025,50	55.763,80	75.380,80	
	50	40.886,80	55.736,20	74.262,50	
	60	34.291,10	55.690,30	71.613,80	

**Tabel 5.15a Data mentah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 410 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4 (410)	10	0	4.710,17	32.966,90	36.000,30
		1	5.789,93	32.981,50	36.041,60
		2	7.882,17	33.007,60	36.143,20
		3	12.483,70	33.073,60	36.279,60
		4	25.280,60	33.373,60	36.396,00
		5	34.307,90	36.446,10	41.032,80
	20	0	4.710,17	31.632,10	35.641,60
		1	5.790,12	31.648,00	35.680,60
		2	7.882,12	31.678,70	35.775,20
		3	12.475,00	31.761,80	35.904,00
		4	25.147,10	32.144,90	36.014,90
		5	33.280,70	36.061,80	41.117,70
	30	0	4.710,16	30.168,70	35.339,20
		1	5.789,73	30.185,70	35.375,50
		2	7.880,12	30.221,70	35.462,10
		3	12.457,20	30.325,30	35.581,70
		4	24.936,30	30.804,90	35.686,20
		5	32.134,80	35.730,20	41.067,90
	40	0	4.709,85	28.638,00	35.089,50
		1	5.788,32	28.654,40	35.122,20
		2	7.875,92	28.693,00	35.198,10
		3	12.431,70	28.812,00	35.305,60
		4	24.656,90	29.374,70	35.403,10
		5	30.852,70	35.445,20	40.886,30
	50	0	4.709,85	27.213,80	34.904,20
		1	5.784,84	27.231,40	34.933,50
		2	7.862,49	27.276,00	34.997,10
		3	12.358,00	27.418,00	35.089,20
		4	23.984,00	28.059,30	37.177,50
		5	29.485,00	35.217,30	39.334,10
60	0	4.709,85	26.062,30	34.777,90	
	1	5.775,59	26.081,10	34.802,90	
	2	7.823,18	26.130,80	34.850,20	
	3	12.150,50	26.288,00	34.921,20	
	4	22.334,30	26.911,90	34.997,50	
	5	27.912,70	33.180,30	35.039,50	



Grafik 5.15a Data mentah, lebar spring $4\mu\text{m}$, panjang beam tether $410\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



Grafik 5.15b Data olah, lebar spring $4\mu\text{m}$, panjang beam tether $410\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.15b Data olah, lebar spring 4 μ m, panjang beam tether 410 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

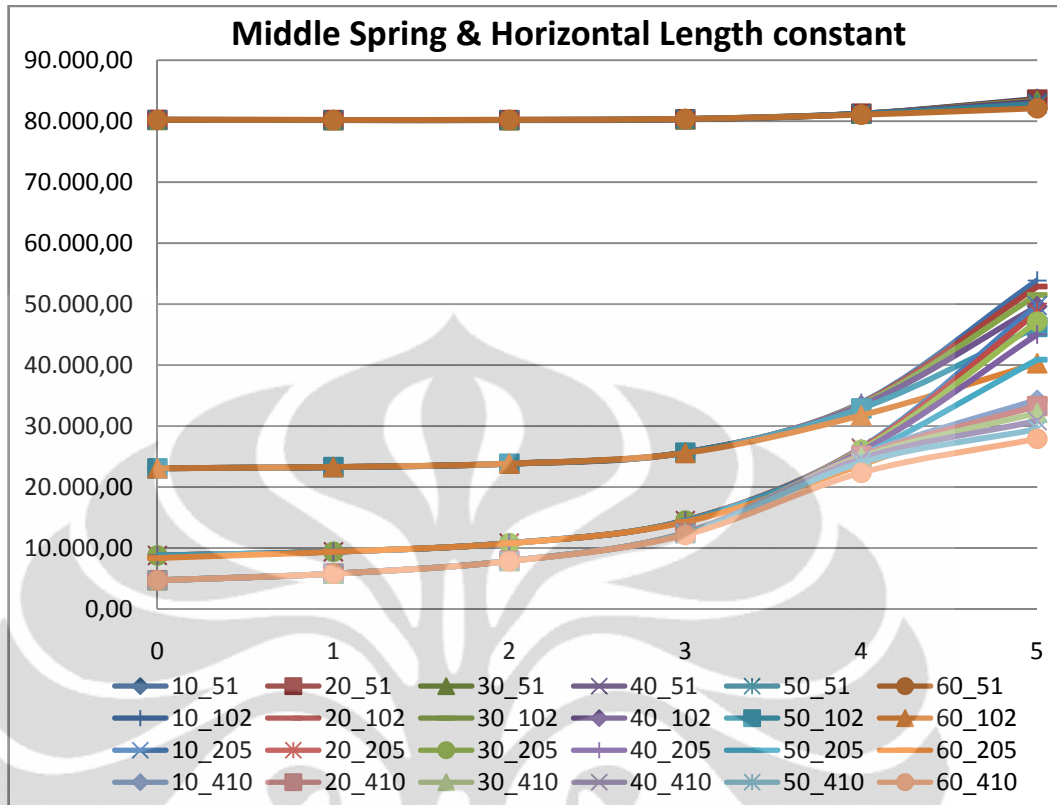
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
4 (410)	0	10	4.710,17	32.966,90	36.000,30
		20	4.710,17	31.632,10	35.641,60
		30	4.710,16	30.168,70	35.339,20
		40	4.709,85	28.638,00	35.089,50
		50	4.709,85	27.213,80	34.904,20
		60	4.709,85	26.062,30	34.777,90
	1	10	5.789,93	32.981,50	36.041,60
		20	5.790,12	31.648,00	35.680,60
		30	5.789,73	30.185,70	35.375,50
		40	5.788,32	28.654,40	35.122,20
		50	5.784,84	27.231,40	34.933,50
		60	5.775,59	26.081,10	34.802,90
	2	10	7.882,17	33.007,60	36.143,20
		20	7.882,12	31.678,70	35.775,20
		30	7.880,12	30.221,70	35.462,10
		40	7.875,92	28.693,00	35.198,10
		50	7.862,49	27.276,00	34.997,10
		60	7.823,18	26.130,80	34.850,20
	3	10	12.483,70	33.073,60	36.279,60
		20	12.475,00	31.761,80	35.904,00
		30	12.457,20	30.325,30	35.581,70
		40	12.431,70	28.812,00	35.305,60
		50	12.358,00	27.418,00	35.089,20
		60	12.150,50	26.288,00	34.921,20
	4	10	25.280,60	33.373,60	36.396,00
		20	25.147,10	32.144,90	36.014,90
		30	24.936,30	30.804,90	35.686,20
		40	24.656,90	29.374,70	35.403,10
		50	23.984,00	28.059,30	37.177,50
		60	22.334,30	26.911,90	34.997,50
5	10	34.307,90	36.446,10	41.032,80	
	20	33.280,70	36.061,80	41.117,70	
	30	32.134,80	35.730,20	41.067,90	
	40	30.852,70	35.445,20	40.886,30	
	50	29.485,00	35.217,30	39.334,10	
	60	27.912,70	33.180,30	35.039,50	

**Tabel 5.16a Data mentah rekap 4 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

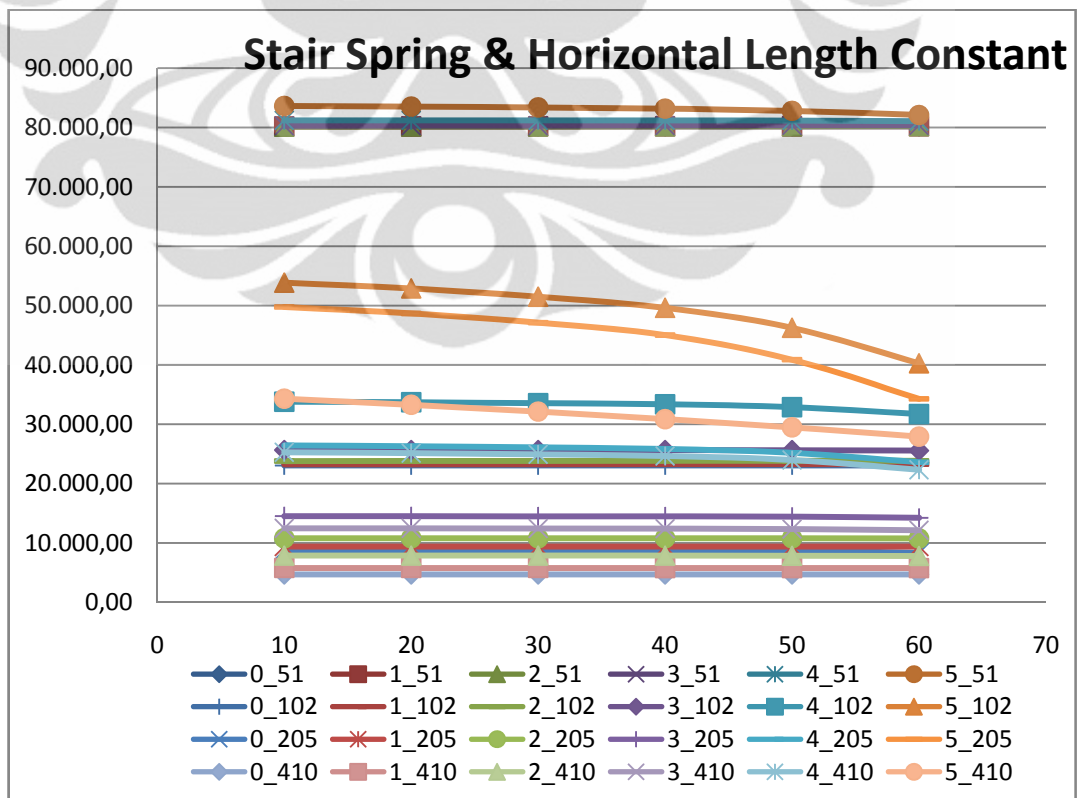
width	Middle spring	Stair spring	fnatural (mode 1)			
			51,00	102,00	205,00	410,00
4	10	0	80.210,00	23.069,00	8.782,19	4.710,17
		1	80.167,70	23.252,60	9.392,89	5.789,93
		2	80.155,80	23.801,60	10.803,30	7.882,17
		3	80.284,80	25.663,60	14.520,40	12.483,70
		4	81.202,00	33.802,50	26.443,50	25.280,60
		5	83.639,90	53.854,60	49.754,60	34.307,90
	20	0	80.210,00	23.069,00	8.782,19	4.710,17
		1	80.174,60	23.258,30	9.394,52	5.790,12
		2	80.169,50	23.812,50	10.808,00	7.882,12
		3	80.304,10	25.658,90	14.515,40	12.475,00
		4	81.209,30	33.715,20	26.315,80	25.147,10
		5	83.536,40	52.876,10	48.668,40	33.280,70
	30	0	80.210,00	23.069,00	8.782,19	4.710,16
		1	80.181,50	23.263,90	9.395,80	5.789,73
		2	80.183,20	23.822,70	10.808,20	7.880,12
		3	80.323,20	25.665,20	14.501,70	12.457,20
		4	81.210,30	33.570,70	26.113,10	24.936,30
		5	83.386,60	51.488,30	47.124,00	32.134,80
	40	0	80.210,00	23.076,10	8.782,05	4.709,85
		1	80.188,30	23.269,20	9.396,51	5.788,32
		2	80.196,80	23.832,40	10.806,70	7.875,92
		3	80.342,00	25.668,30	14.483,10	12.431,70
		4	81.206,60	33.379,10	25.847,60	24.656,90
		5	83.180,20	49.612,00	45.025,50	30.852,70
	50	0	80.210,00	23.068,90	8.783,57	4.709,85
		1	80.195,20	23.274,10	9.395,90	5.784,84
		2	80.210,30	23.839,10	10.799,60	7.862,49
		3	80.359,10	25.648,60	14.436,30	12.358,00
		4	81.171,60	32.898,10	25.199,20	23.984,00
		5	82.800,20	46.248,80	40.886,80	29.485,00
60	0	80.210,00	23.068,90	8.351,24	4.709,85	
	1	80.202,00	23.277,70	9.391,76	5.775,59	
	2	80.223,50	23.838,00	10.773,60	7.823,18	
	3	80.372,00	25.567,20	14.249,20	12.150,50	
	4	81.063,70	31.729,60	23.615,70	22.334,30	
	5	82.106,90	40.271,50	34.291,10	27.912,70	

**Tabel 5.16b Data olah rekap 4 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

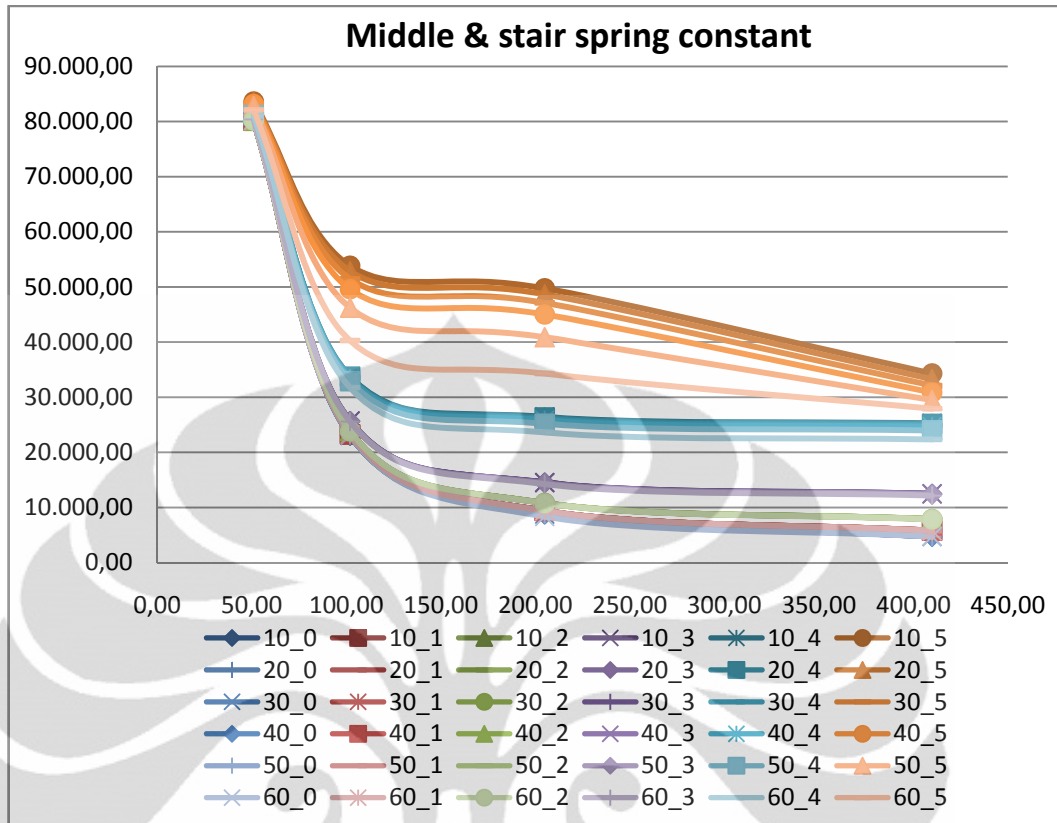
width	Middle spring	Stair spring	fnatural (mode 1)			
			51,00	102,00	205,00	410,00
4	0	10	80.210,00	23.069,00	8.782,19	4.710,17
		20	80.210,00	23.069,00	8.782,19	4.710,17
		30	80.210,00	23.069,00	8.782,19	4.710,16
		40	80.210,00	23.076,10	8.782,05	4.709,85
		50	80.210,00	23.068,90	8.783,57	4.709,85
		60	80.210,00	23.068,90	8.351,24	4.709,85
	1	10	80.167,70	23.252,60	9.392,89	5.789,93
		20	80.174,60	23.258,30	9.394,52	5.790,12
		30	80.181,50	23.263,90	9.395,80	5.789,73
		40	80.188,30	23.269,20	9.396,51	5.788,32
		50	80.195,20	23.274,10	9.395,90	5.784,84
		60	80.202,00	23.277,70	9.391,76	5.775,59
	2	10	80.155,80	23.801,60	10.803,30	7.882,17
		20	80.169,50	23.812,50	10.808,00	7.882,12
		30	80.183,20	23.822,70	10.808,20	7.880,12
		40	80.196,80	23.832,40	10.806,70	7.875,92
		50	80.210,30	23.839,10	10.799,60	7.862,49
		60	80.223,50	23.838,00	10.773,60	7.823,18
	3	10	80.284,80	25.663,60	14.520,40	12.483,70
		20	80.304,10	25.658,90	14.515,40	12.475,00
		30	80.323,20	25.665,20	14.501,70	12.457,20
		40	80.342,00	25.668,30	14.483,10	12.431,70
		50	80.359,10	25.648,60	14.436,30	12.358,00
		60	80.372,00	25.567,20	14.249,20	12.150,50
	4	10	81.202,00	33.802,50	26.443,50	25.280,60
		20	81.209,30	33.715,20	26.315,80	25.147,10
		30	81.210,30	33.570,70	26.113,10	24.936,30
		40	81.206,60	33.379,10	25.847,60	24.656,90
		50	81.171,60	32.898,10	25.199,20	23.984,00
		60	81.063,70	31.729,60	23.615,70	22.334,30
5	10	83.639,90	53.854,60	49.754,60	34.307,90	
	20	83.536,40	52.876,10	48.668,40	33.280,70	
	30	83.386,60	51.488,30	47.124,00	32.134,80	
	40	83.180,20	49.612,00	45.025,50	30.852,70	
	50	82.800,20	46.248,80	40.886,80	29.485,00	
	60	82.106,90	40.271,50	34.291,10	27.912,70	



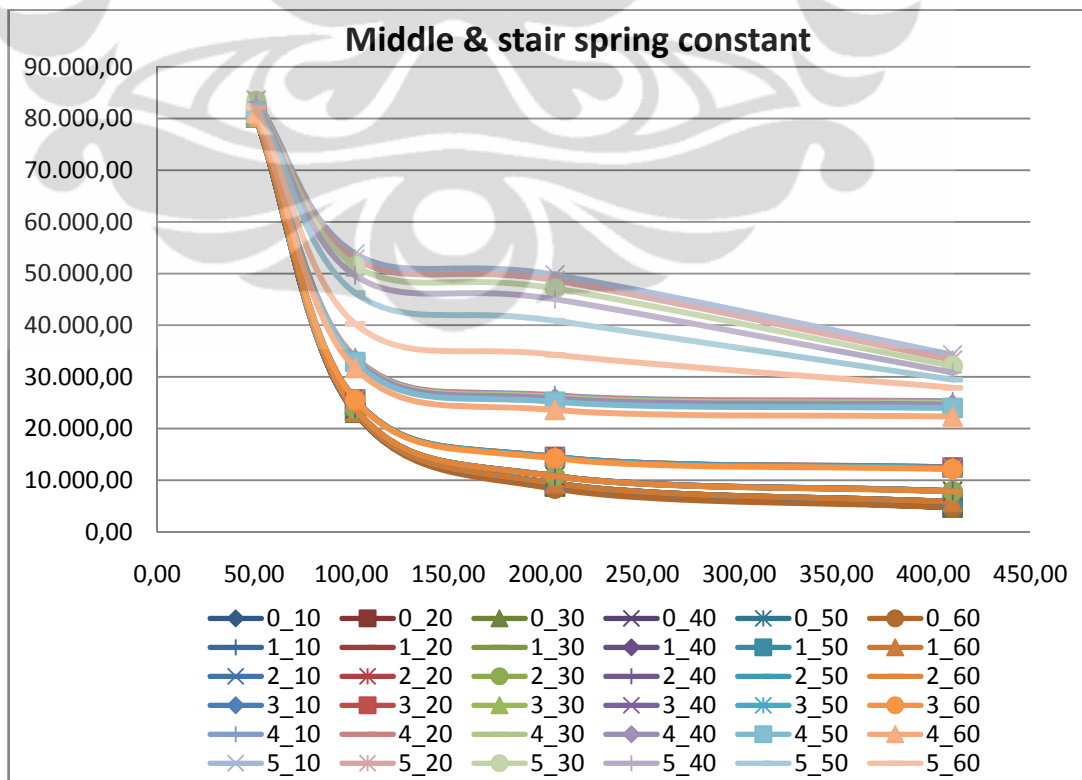
Grafik 5.17a Data rekap 4 μ m (1)



Grafik 5.17b Data rekap 4 μ m (2)



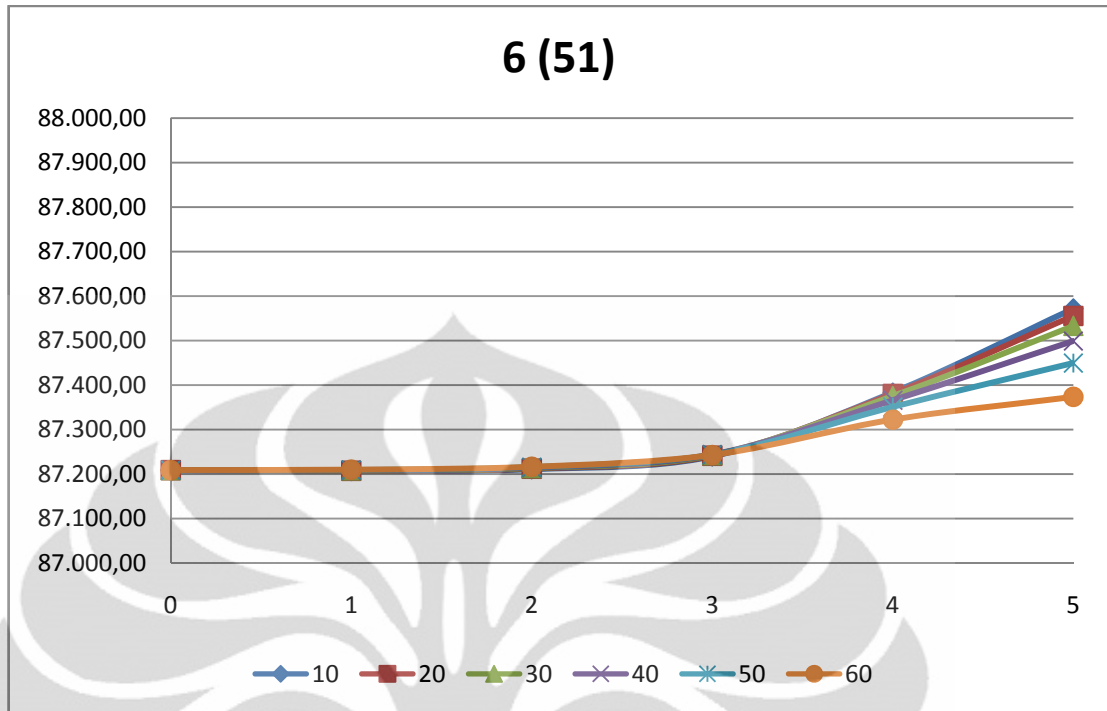
Grafik 5.17c Data rekap 4 μ m (3)



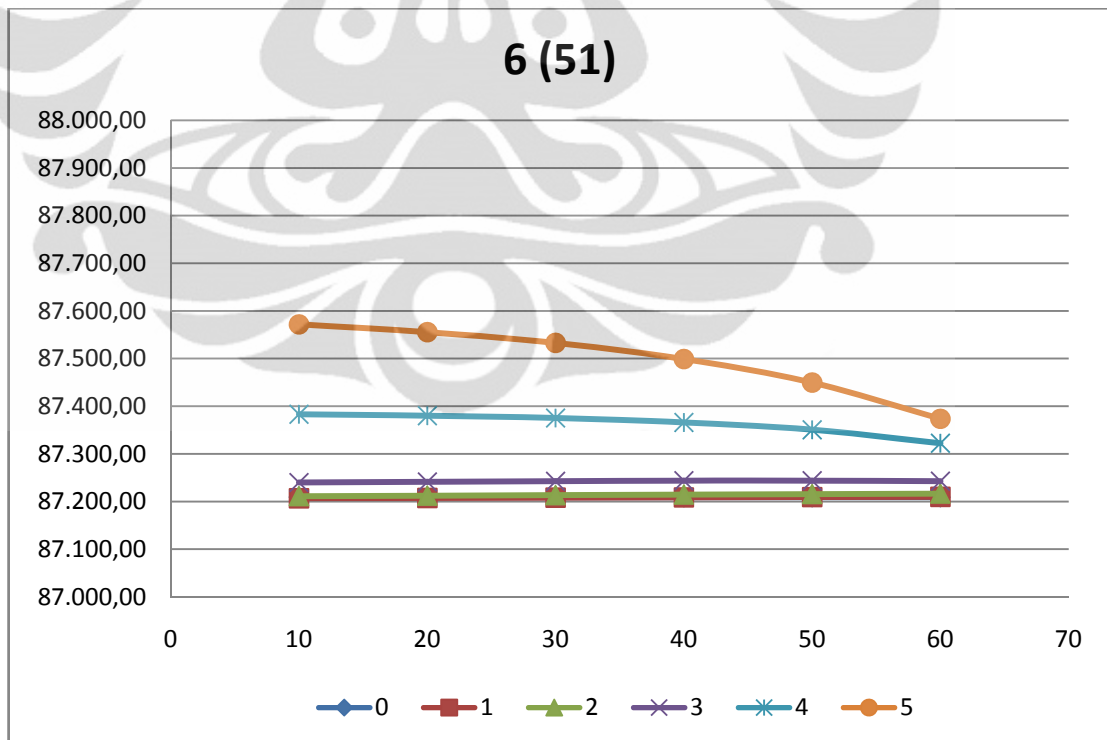
Grafik 5.17d Data rekap 4 μ m (4)

**Tabel 5.18a Data mentah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 51 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6 (51)	10	0	87.209,20	88.263,50	88.792,60
		1	87.207,00	88.262,70	88.797,80
		2	87.211,20	88.264,30	88.802,00
		3	87.240,00	88.266,50	88.797,40
		4	87.383,30	88.272,30	88.797,90
		5	87.571,90	88.290,40	88.796,20
	20	0	87.209,10	88.247,40	88.802,60
		1	87.207,60	88.247,80	88.805,00
		2	87.212,30	88.248,10	88.801,50
		3	87.241,40	88.249,10	88.802,10
		4	87.380,30	88.259,80	88.803,30
		5	87.555,60	88.274,00	88.802,80
	30	0	87.209,10	88.233,30	88.805,20
		1	87.208,20	88.231,80	88.805,80
		2	87.213,50	88.233,50	88.806,70
		3	87.242,60	88.236,10	88.804,70
		4	87.375,40	88.244,60	88.803,20
		5	87.533,00	88.258,30	88.805,10
	40	0	87.209,10	88.219,80	88.821,10
		1	87.208,80	88.221,60	88.822,90
		2	87.214,60	88.221,30	88.823,40
		3	87.243,80	88.214,90	88.821,10
		4	87.366,20	88.232,50	88.821,10
		5	87.499,10	88.244,10	88.817,80
	50	0	87.209,10	88.211,50	88.824,60
		1	87.209,40	88.211,80	88.823,00
		2	87.215,60	88.211,70	88.820,10
		3	87.243,80	88.214,90	88.821,10
		4	87.350,80	88.222,30	88.823,70
		5	87.449,70	88.229,30	88.820,20
60	0	87.209,10	88.204,60	88.820,20	
	1	87.210,00	88.206,00	88.823,90	
	2	87.216,60	88.205,50	88.822,00	
	3	87.242,90	88.208,30	88.823,70	
	4	87.322,50	88.213,20	88.822,50	
	5	87.373,70	88.216,20	88.823,50	



Grafik 5.18a Data mentah, lebar spring $6\mu\text{m}$, panjang beam tether $51\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



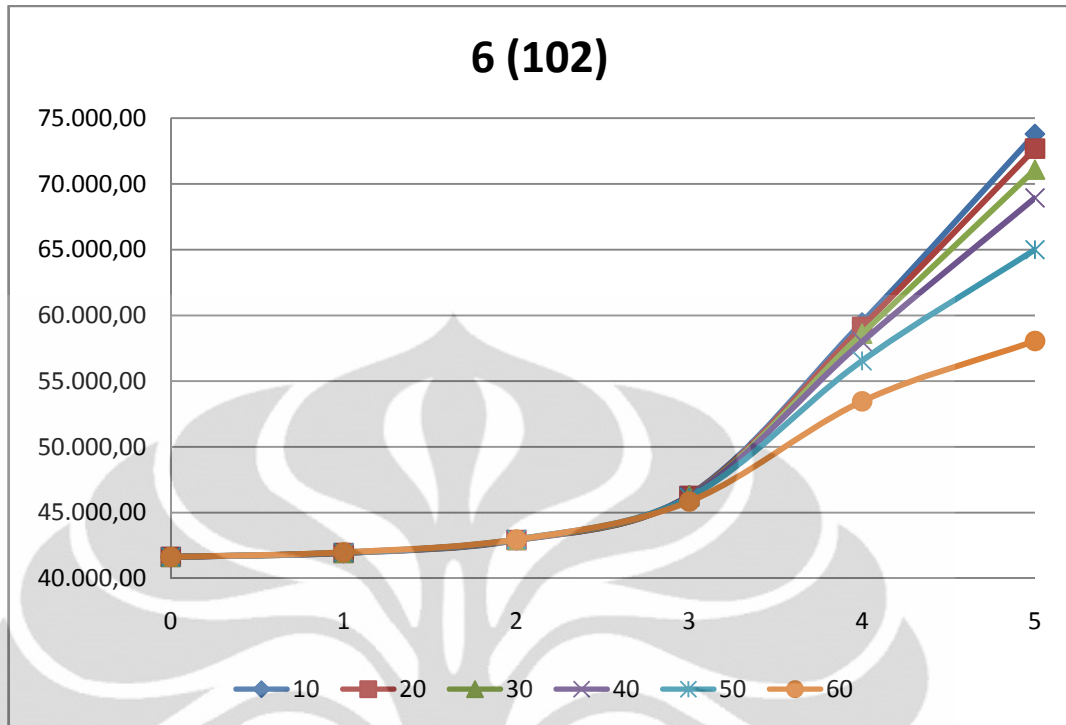
Grafik 5.18b Data olah, lebar spring $6\mu\text{m}$, panjang beam tether $51\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.18b Data olah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 51 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

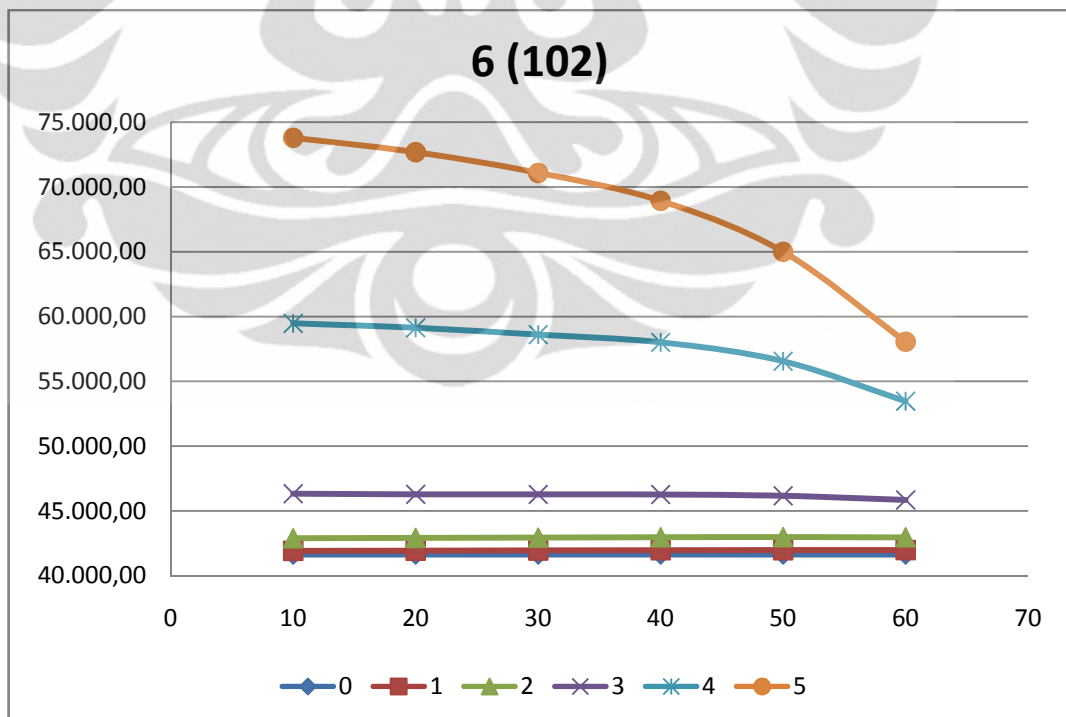
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6 (51)	0	10	87.209,20	88.263,50	88.792,60
		20	87.209,10	88.247,40	88.802,60
		30	87.209,10	88.233,30	88.805,20
		40	87.209,10	88.219,80	88.821,10
		50	87.209,10	88.211,50	88.824,60
		60	87.209,10	88.204,60	88.820,20
	1	10	87.207,00	88.262,70	88.797,80
		20	87.207,60	88.247,80	88.805,00
		30	87.208,20	88.231,80	88.805,80
		40	87.208,80	88.221,60	88.822,90
		50	87.209,40	88.211,80	88.823,00
		60	87.210,00	88.206,00	88.823,90
	2	10	87.211,20	88.264,30	88.802,00
		20	87.212,30	88.248,10	88.801,50
		30	87.213,50	88.233,50	88.806,70
		40	87.214,60	88.221,30	88.823,40
		50	87.215,60	88.211,70	88.820,10
		60	87.216,60	88.205,50	88.822,00
	3	10	87.240,00	88.266,50	88.797,40
		20	87.241,40	88.249,10	88.802,10
		30	87.242,60	88.236,10	88.804,70
		40	87.243,80	88.214,90	88.821,10
		50	87.243,80	88.214,90	88.821,10
		60	87.242,90	88.208,30	88.823,70
	4	10	87.383,30	88.272,30	88.797,90
		20	87.380,30	88.259,80	88.803,30
		30	87.375,40	88.244,60	88.803,20
		40	87.366,20	88.232,50	88.821,10
		50	87.350,80	88.222,30	88.823,70
		60	87.322,50	88.213,20	88.822,50
5	10	87.571,90	88.290,40	88.796,20	
	20	87.555,60	88.274,00	88.802,80	
	30	87.533,00	88.258,30	88.805,10	
	40	87.499,10	88.244,10	88.817,80	
	50	87.449,70	88.229,30	88.820,20	
	60	87.373,70	88.216,20	88.823,50	

**Tabel 5.19a Data mentah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 102 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6 (102)	10	0	41.638,30	87.653,80	88.795,90
		1	41.922,90	87.654,80	88.797,60
		2	42.891,70	87.657,10	88.796,20
		3	46.330,90	87.669,50	88.797,70
		4	59.477,40	87.703,00	88.800,00
		5	73.796,00	87.759,50	88.791,50
	20	0	41.638,30	87.583,10	88.796,80
		1	41.937,30	87.584,20	88.799,10
		2	42.917,70	87.586,40	88.795,10
		3	46.283,60	87.595,50	88.797,70
		4	59.135,50	87.636,90	88.792,80
		5	72.690,20	87.694,70	88.794,40
	30	0	41.638,30	87.516,90	88.801,80
		1	41.951,20	87.571,80	88.799,00
		2	42.941,30	87.520,10	88.800,40
		3	46.278,00	87.530,00	88.799,60
		4	58.611,00	87.573,50	88.799,90
		5	71.088,50	87.630,50	88.799,10
	40	0	41.638,20	87.457,70	88.833,40
		1	41.964,90	87.458,30	88.831,90
		2	42.964,60	87.460,60	88.832,50
		3	46.269,70	87.470,30	88.833,70
		4	58.012,10	87.513,40	88.832,00
		5	68.938,00	87.566,80	88.833,40
	50	0	41.638,30	87.409,60	88.832,20
		1	41.976,80	87.410,20	88.830,30
		2	42.976,20	87.412,80	88.832,10
		3	46.168,40	87.422,90	88.830,80
		4	56.554,00	87.463,40	88.830,40
		5	65.001,40	87.505,00	88.831,90
60	0	41.638,30	87.375,70	88.829,80	
	1	41.985,60	87.376,00	88.829,20	
	2	42.961,20	87.379,00	88.830,50	
	3	45.847,90	87.388,80	88.830,40	
	4	53.470,30	87.419,40	88.831,10	
	5	58.060,50	87.440,90	88.830,00	



Grafik 5.19a Data mentah, lebar spring $6\mu\text{m}$, panjang beam tether $102\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



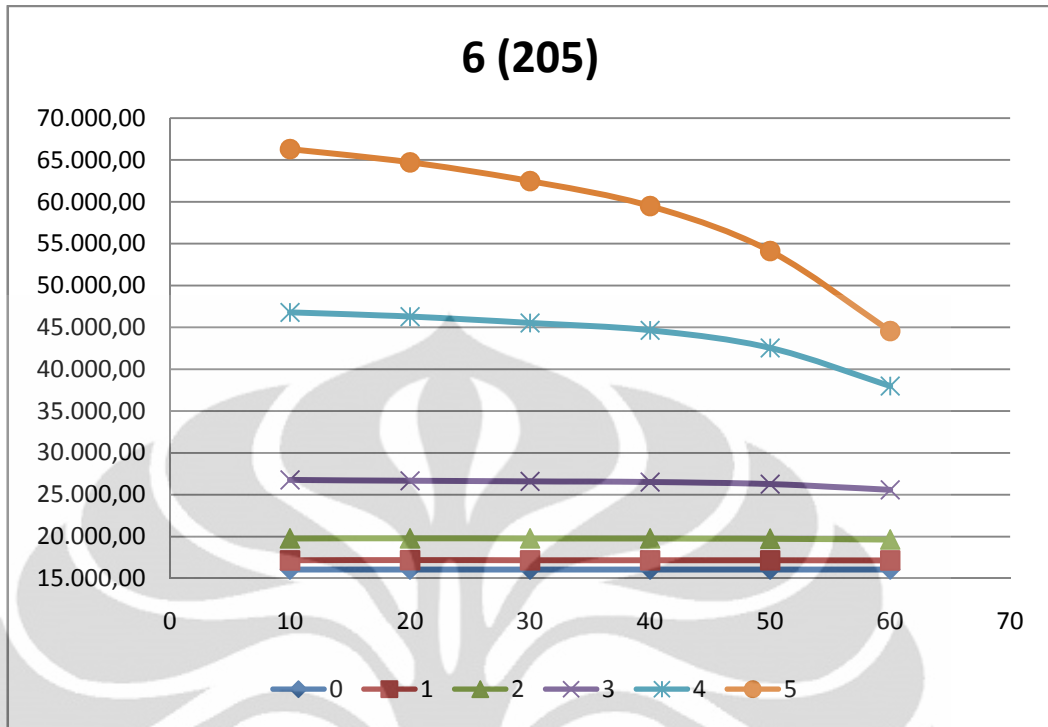
Grafik 5.19b Data olah, lebar spring $6\mu\text{m}$, panjang beam tether $102\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.19b Data olah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 102 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

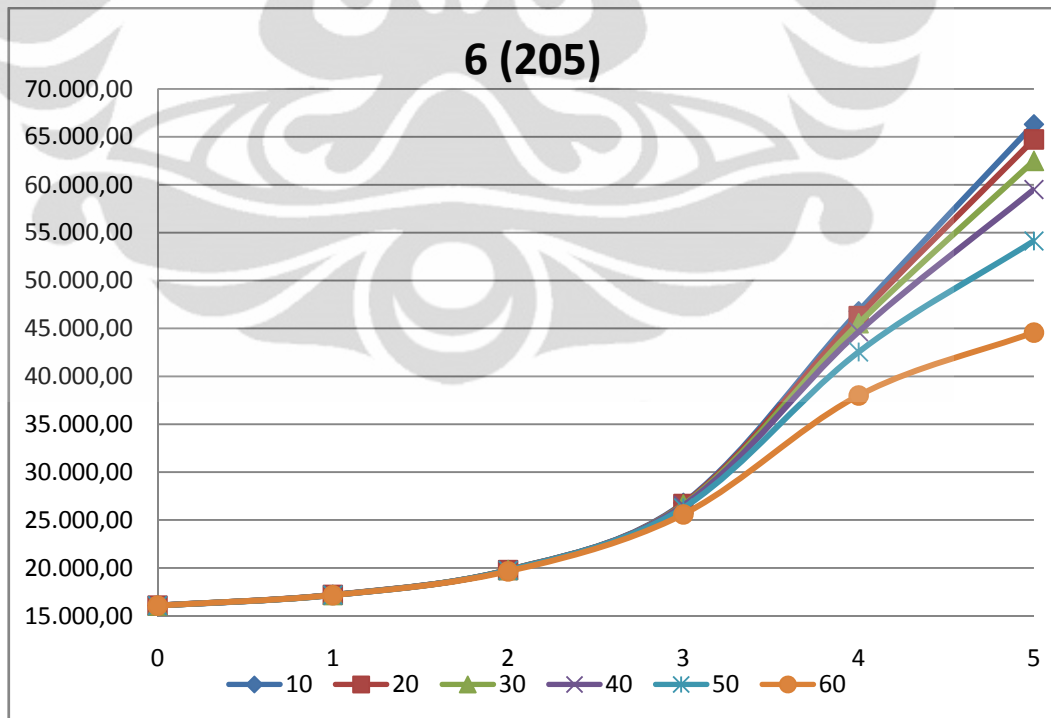
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6 (102)	0	10	41.638,30	87.653,80	88.795,90
		20	41.638,30	87.583,10	88.796,80
		30	41.638,30	87.516,90	88.801,80
		40	41.638,20	87.457,70	88.833,40
		50	41.638,30	87.409,60	88.832,20
		60	41.638,30	87.375,70	88.829,80
	1	10	41.922,90	87.654,80	88.797,60
		20	41.937,30	87.584,20	88.799,10
		30	41.951,20	87.571,80	88.799,00
		40	41.964,90	87.458,30	88.831,90
		50	41.976,80	87.410,20	88.830,30
		60	41.985,60	87.376,00	88.829,20
	2	10	42.891,70	87.657,10	88.796,20
		20	42.917,70	87.586,40	88.795,10
		30	42.941,30	87.520,10	88.800,40
		40	42.964,60	87.460,60	88.832,50
		50	42.976,20	87.412,80	88.832,10
		60	42.961,20	87.379,00	88.830,50
	3	10	46.330,90	87.669,50	88.797,70
		20	46.283,60	87.595,50	88.797,70
		30	46.278,00	87.530,00	88.799,60
		40	46.269,70	87.470,30	88.833,70
		50	46.168,40	87.422,90	88.830,80
		60	45.847,90	87.388,80	88.830,40
	4	10	59.477,40	87.703,00	88.800,00
		20	59.135,50	87.636,90	88.792,80
		30	58.611,00	87.573,50	88.799,90
		40	58.012,10	87.513,40	88.832,00
		50	56.554,00	87.463,40	88.830,40
		60	53.470,30	87.419,40	88.831,10
5	10	73.796,00	87.759,50	88.791,50	
	20	72.690,20	87.694,70	88.794,40	
	30	71.088,50	87.630,50	88.799,10	
	40	68.938,00	87.566,80	88.833,40	
	50	65.001,40	87.505,00	88.831,90	
	60	58.060,50	87.440,90	88.830,00	

**Tabel 5.20a Data mentah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 205 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6 (205)	10	0	16.061,80	72.553,90	86.183,70
		1	17.161,60	72.492,10	86.169,10
		2	19.778,60	72.413,50	86.201,00
		3	26.773,20	72.692,00	86.256,90
		4	46.795,30	72.414,80	86.417,40
		5	66.309,70	72.545,30	86.657,50
	20	0	16.061,80	72.520,40	85.808,70
		1	17.188,20	72.541,20	85.741,00
		2	19.781,30	72.413,90	85.828,80
		3	26.673,70	72.309,80	85.876,30
		4	46.289,40	72.420,70	86.097,60
		5	64.727,10	72.546,40	86.377,50
	30	0	16.061,80	72.481,20	85.404,20
		1	17.167,20	72.457,30	85.410,10
		2	19.778,30	72.407,60	85.427,40
		3	26.601,00	72.386,20	85.489,50
		4	45.530,60	72.419,30	85.751,80
		5	62.480,10	72.538,80	86.063,00
	40	0	16.068,70	72.403,70	84.599,00
		1	17.168,30	72.386,70	84.995,20
		2	19.773,20	72.352,00	85.013,50
		3	26.522,00	72.337,20	85.083,50
		4	44.650,40	72.731,10	85.377,90
		5	59.498,50	72.505,00	85.709,00
	50	0	16.061,50	72.335,20	84.614,30
		1	17.164,50	72.340,80	84.620,00
		2	19.739,90	72.319,40	84.641,90
		3	26.268,10	72.310,00	84.723,50
		4	42.545,30	72.340,40	85.031,80
		5	54.129,40	72.459,70	85.320,40
60	0	16.061,50	72.258,70	84.321,20	
	1	17.151,50	72.273,40	84.328,10	
	2	19.640,30	72.264,20	84.352,50	
	3	25.589,90	72.260,10	84.438,10	
	4	37.994,30	72.284,10	84.692,10	
	5	44.568,30	72.379,20	84.859,90	



Grafik 5.20a Data mentah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 205 μ m (variasi middle spring dan stair spring)



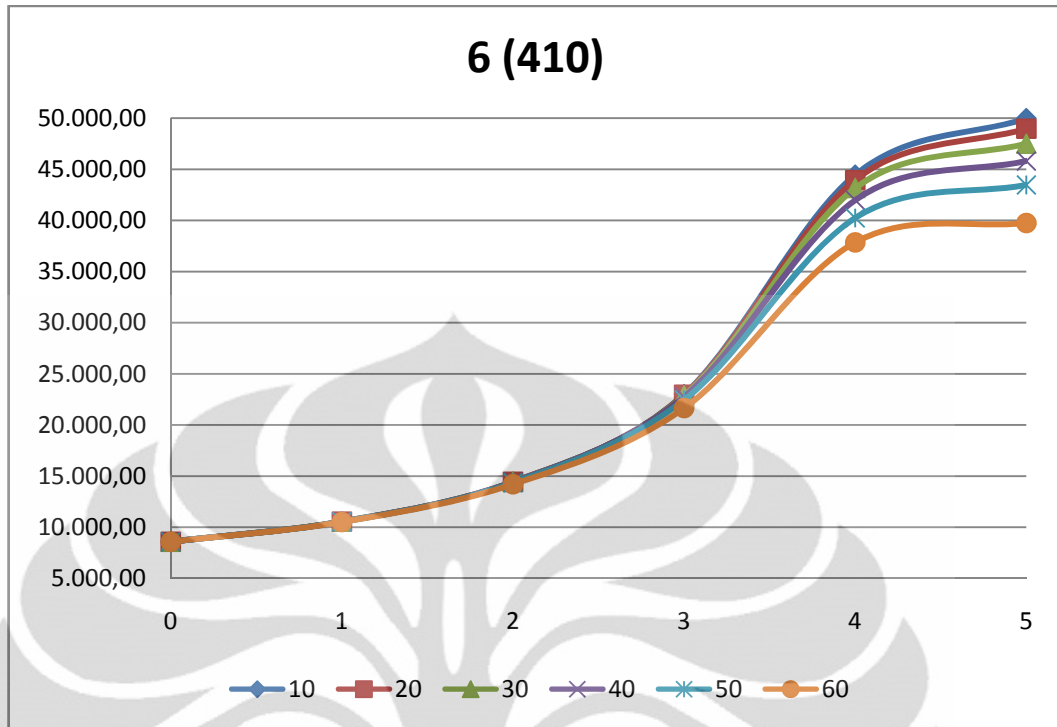
Grafik 5.20b Data olah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 205 μ m (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.20b Data olah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 205 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

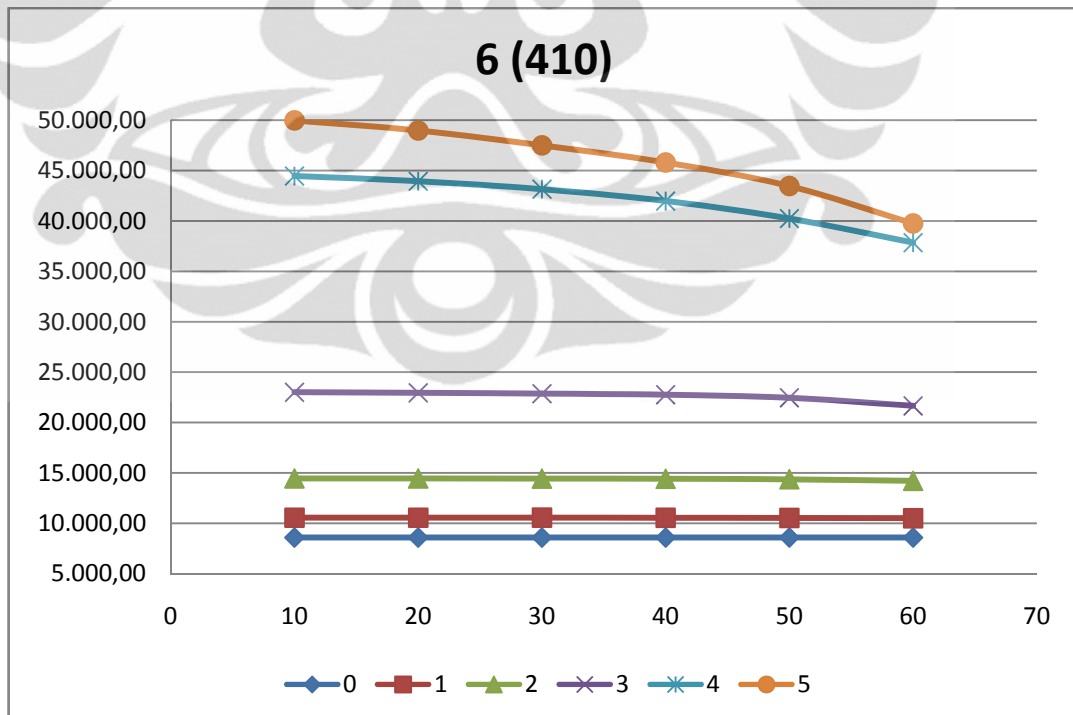
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6 (205)	0	10	16.061,80	72.553,90	86.183,70
		20	16.061,80	72.520,40	85.808,70
		30	16.061,80	72.481,20	85.404,20
		40	16.068,70	72.403,70	84.599,00
		50	16.061,50	72.335,20	84.614,30
		60	16.061,50	72.258,70	84.321,20
	1	10	17.161,60	72.492,10	86.169,10
		20	17.188,20	72.541,20	85.741,00
		30	17.167,20	72.457,30	85.410,10
		40	17.168,30	72.386,70	84.995,20
		50	17.164,50	72.340,80	84.620,00
		60	17.151,50	72.273,40	84.328,10
	2	10	19.778,60	72.413,50	86.201,00
		20	19.781,30	72.413,90	85.828,80
		30	19.778,30	72.407,60	85.427,40
		40	19.773,20	72.352,00	85.013,50
		50	19.739,90	72.319,40	84.641,90
		60	19.640,30	72.264,20	84.352,50
	3	10	26.773,20	72.692,00	86.256,90
		20	26.673,70	72.309,80	85.876,30
		30	26.601,00	72.386,20	85.489,50
		40	26.522,00	72.337,20	85.083,50
		50	26.268,10	72.310,00	84.723,50
		60	25.589,90	72.260,10	84.438,10
	4	10	46.795,30	72.414,80	86.417,40
		20	46.289,40	72.420,70	86.097,60
		30	45.530,60	72.419,30	85.751,80
		40	44.650,40	72.731,10	85.377,90
		50	42.545,30	72.340,40	85.031,80
		60	37.994,30	72.284,10	84.692,10
5	10	66.309,70	72.545,30	86.657,50	
	20	64.727,10	72.546,40	86.377,50	
	30	62.480,10	72.538,80	86.063,00	
	40	59.498,50	72.505,00	85.709,00	
	50	54.129,40	72.459,70	85.320,40	
	60	44.568,30	72.379,20	84.859,90	

**Tabel 5.21a Data mentah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 410 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6 (410)	10	0	8.589,39	46.096,70	47.698,40
		1	10.561,10	46.129,10	47.778,10
		2	14.453,70	46.197,70	47.946,00
		3	23.008,70	46.391,80	48.168,40
		4	44.464,90	47.193,30	48.352,10
		5	49.988,60	45.091,90	48.088,60
	20	0	8.589,38	44.461,20	47.314,30
		1	10.560,10	44.495,00	47.388,00
		2	14.447,70	44.572,10	47.541,90
		3	22.956,70	44.799,50	47.747,70
		4	43.945,30	45.730,30	47.920,10
		5	48.977,20	45.982,00	47.852,80
	30	0	8.589,37	42.814,50	46.992,00
		1	10.567,10	42.887,20	47.095,50
		2	14.434,00	42.935,50	47.197,20
		3	22.867,20	43.197,30	47.383,90
		4	43.159,20	44.244,40	47.543,60
		5	47.508,40	44.599,40	47.734,20
	40	0	8.588,70	41.238,40	46.725,60
		1	10.551,60	41.270,80	46.785,10
		2	14.416,90	41.356,60	46.903,00
		3	22.765,70	41.632,10	47.066,10
		4	41.986,90	42.737,10	47.213,40
		5	45.810,30	43.269,60	47.656,70
	50	0	8.588,71	39.888,80	46.531,10
		1	10.538,60	39.923,30	46.583,60
		2	14.361,40	40.017,80	46.680,10
		3	22.462,00	40.319,50	46.815,70
		4	40.243,80	41.414,20	46.947,10
		5	43.471,30	41.999,80	46.550,00
60	0	8.588,73	38.883,20	46.400,80	
	1	10.510,40	38.920,00	46.446,10	
	2	14.213,90	39.019,60	46.519,00	
	3	21.659,60	39.318,50	46.622,20	
	4	37.856,40	40.175,30	46.737,60	
	5	39.757,20	42.158,30	46.798,00	



Grafik 5.21a Data mentah, lebar spring $6\mu\text{m}$, panjang beam tether $410\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



Grafik 5.21b Data olah, lebar spring $6\mu\text{m}$, panjang beam tether $410\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.21b Data olah, lebar spring 6 μ m, panjang beam tether 410 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

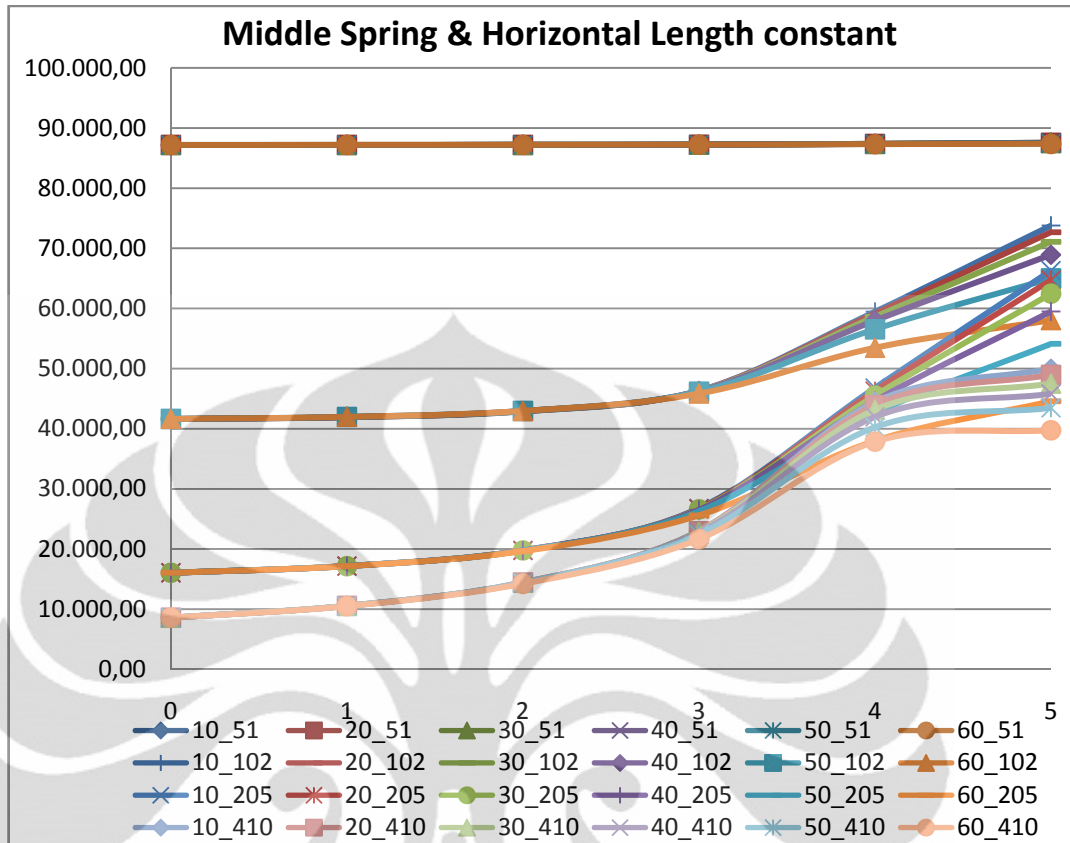
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
6 (410)	0	10	8.589,39	46.096,70	47.698,40
		20	8.589,38	44.461,20	47.314,30
		30	8.589,37	42.814,50	46.992,00
		40	8.588,70	41.238,40	46.725,60
		50	8.588,71	39.888,80	46.531,10
		60	8.588,73	38.883,20	46.400,80
	1	10	10.561,10	46.129,10	47.778,10
		20	10.560,10	44.495,00	47.388,00
		30	10.567,10	42.887,20	47.095,50
		40	10.551,60	41.270,80	46.785,10
		50	10.538,60	39.923,30	46.583,60
		60	10.510,40	38.920,00	46.446,10
	2	10	14.453,70	46.197,70	47.946,00
		20	14.447,70	44.572,10	47.541,90
		30	14.434,00	42.935,50	47.197,20
		40	14.416,90	41.356,60	46.903,00
		50	14.361,40	40.017,80	46.680,10
		60	14.213,90	39.019,60	46.519,00
	3	10	23.008,70	46.391,80	48.168,40
		20	22.956,70	44.799,50	47.747,70
		30	22.867,20	43.197,30	47.383,90
		40	22.765,70	41.632,10	47.066,10
		50	22.462,00	40.319,50	46.815,70
		60	21.659,60	39.318,50	46.622,20
	4	10	44.464,90	47.193,30	48.352,10
		20	43.945,30	45.730,30	47.920,10
		30	43.159,20	44.244,40	47.543,60
		40	41.986,90	42.737,10	47.213,40
		50	40.243,80	41.414,20	46.947,10
		60	37.856,40	40.175,30	46.737,60
5	10	49.988,60	45.091,90	48.088,60	
	20	48.977,20	45.982,00	47.852,80	
	30	47.508,40	44.599,40	47.734,20	
	40	45.810,30	43.269,60	47.656,70	
	50	43.471,30	41.999,80	46.550,00	
	60	39.757,20	42.158,30	46.798,00	

**Tabel 5.22a Data mentah rekap 6 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

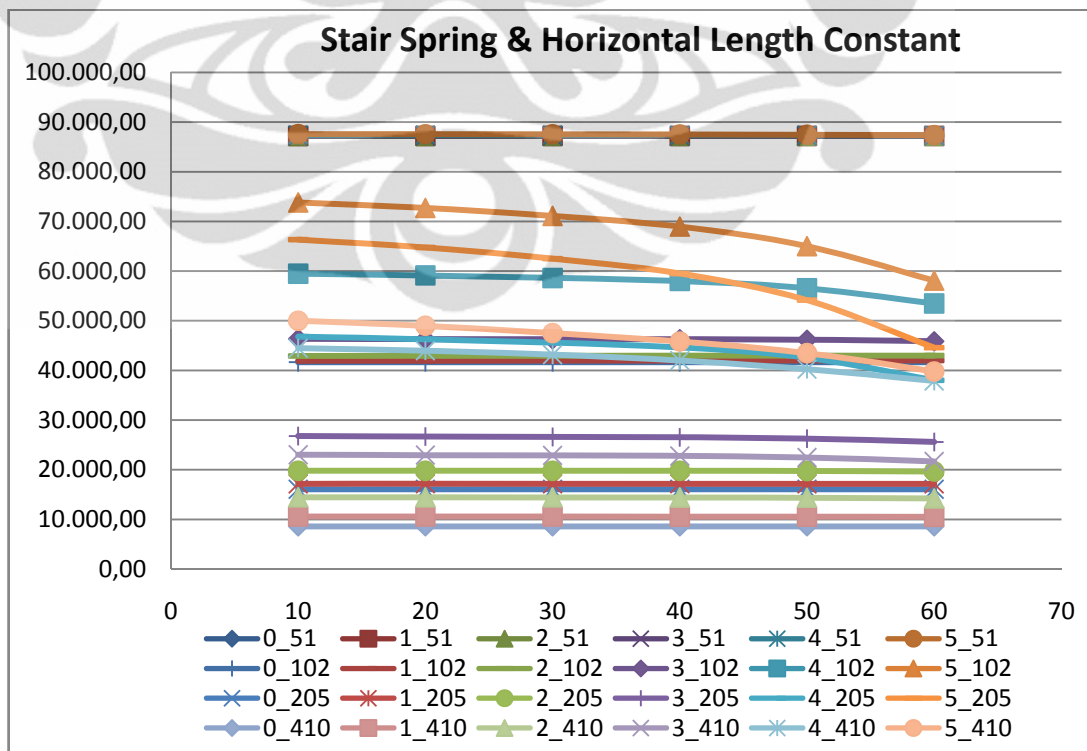
width	Middle spring	Stair spring	fnatural (mode 1)			
			51,00	102,00	205,00	410,00
6	10	0	87.209,20	41.638,30	16.061,80	8.589,39
		1	87.207,00	41.922,90	17.161,60	10.561,10
		2	87.211,20	42.891,70	19.778,60	14.453,70
		3	87.240,00	46.330,90	26.773,20	23.008,70
		4	87.383,30	59.477,40	46.795,30	44.464,90
		5	87.571,90	73.796,00	66.309,70	49.988,60
	20	0	87.209,10	41.638,30	16.061,80	8.589,38
		1	87.207,60	41.937,30	17.188,20	10.560,10
		2	87.212,30	42.917,70	19.781,30	14.447,70
		3	87.241,40	46.283,60	26.673,70	22.956,70
		4	87.380,30	59.135,50	46.289,40	43.945,30
		5	87.555,60	72.690,20	64.727,10	48.977,20
	30	0	87.209,10	41.638,30	16.061,80	8.589,37
		1	87.208,20	41.951,20	17.167,20	10.567,10
		2	87.213,50	42.941,30	19.778,30	14.434,00
		3	87.242,60	46.278,00	26.601,00	22.867,20
		4	87.375,40	58.611,00	45.530,60	43.159,20
		5	87.533,00	71.088,50	62.480,10	47.508,40
	40	0	87.209,10	41.638,20	16.068,70	8.588,70
		1	87.208,80	41.964,90	17.168,30	10.551,60
		2	87.214,60	42.964,60	19.773,20	14.416,90
		3	87.243,80	46.269,70	26.522,00	22.765,70
		4	87.366,20	58.012,10	44.650,40	41.986,90
		5	87.499,10	68.938,00	59.498,50	45.810,30
	50	0	87.209,10	41.638,30	16.061,50	8.588,71
		1	87.209,40	41.976,80	17.164,50	10.538,60
		2	87.215,60	42.976,20	19.739,90	14.361,40
		3	87.243,80	46.168,40	26.268,10	22.462,00
		4	87.350,80	56.554,00	42.545,30	40.243,80
		5	87.449,70	65.001,40	54.129,40	43.471,30
60	0	87.209,10	41.638,30	16.061,50	8.588,73	
	1	87.210,00	41.985,60	17.151,50	10.510,40	
	2	87.216,60	42.961,20	19.640,30	14.213,90	
	3	87.242,90	45.847,90	25.589,90	21.659,60	
	4	87.322,50	53.470,30	37.994,30	37.856,40	
	5	87.373,70	58.060,50	44.568,30	39.757,20	

**Tabel 5.22b Data olah rekap 6 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

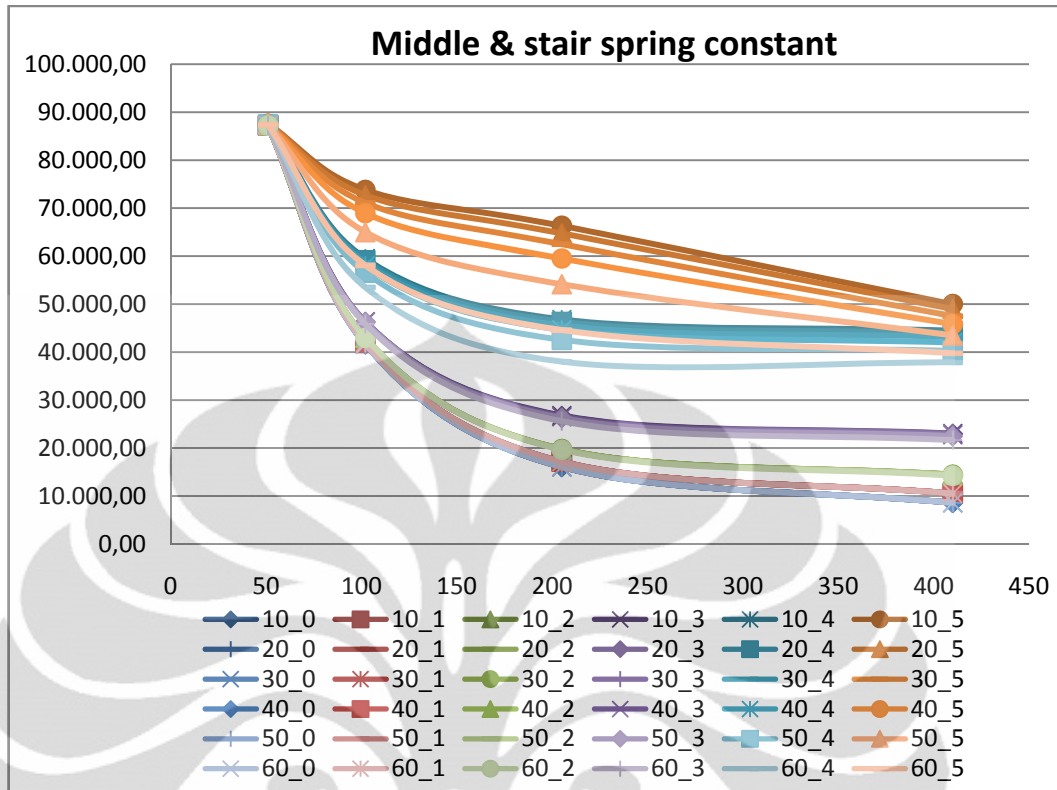
width	Middle spring	Stair spring	fnatural (mode 1)			
			51,00	102,00	205,00	410,00
6	0	10	87.209,20	41.638,30	16.061,80	8.589,39
		20	87.209,10	41.638,30	16.061,80	8.589,38
		30	87.209,10	41.638,30	16.061,80	8.589,37
		40	87.209,10	41.638,20	16.068,70	8.588,70
		50	87.209,10	41.638,30	16.061,50	8.588,71
		60	87.209,10	41.638,30	16.061,50	8.588,73
	1	10	87.207,00	41.922,90	17.161,60	10.561,10
		20	87.207,60	41.937,30	17.188,20	10.560,10
		30	87.208,20	41.951,20	17.167,20	10.567,10
		40	87.208,80	41.964,90	17.168,30	10.551,60
		50	87.209,40	41.976,80	17.164,50	10.538,60
		60	87.210,00	41.985,60	17.151,50	10.510,40
	2	10	87.211,20	42.891,70	19.778,60	14.453,70
		20	87.212,30	42.917,70	19.781,30	14.447,70
		30	87.213,50	42.941,30	19.778,30	14.434,00
		40	87.214,60	42.964,60	19.773,20	14.416,90
		50	87.215,60	42.976,20	19.739,90	14.361,40
		60	87.216,60	42.961,20	19.640,30	14.213,90
	3	10	87.240,00	46.330,90	26.773,20	23.008,70
		20	87.241,40	46.283,60	26.673,70	22.956,70
		30	87.242,60	46.278,00	26.601,00	22.867,20
		40	87.243,80	46.269,70	26.522,00	22.765,70
		50	87.243,80	46.168,40	26.268,10	22.462,00
		60	87.242,90	45.847,90	25.589,90	21.659,60
	4	10	87.383,30	59.477,40	46.795,30	44.464,90
		20	87.380,30	59.135,50	46.289,40	43.945,30
		30	87.375,40	58.611,00	45.530,60	43.159,20
		40	87.366,20	58.012,10	44.650,40	41.986,90
		50	87.350,80	56.554,00	42.545,30	40.243,80
		60	87.322,50	53.470,30	37.994,30	37.856,40
5	10	87.571,90	73.796,00	66.309,70	49.988,60	
	20	87.555,60	72.690,20	64.727,10	48.977,20	
	30	87.533,00	71.088,50	62.480,10	47.508,40	
	40	87.499,10	68.938,00	59.498,50	45.810,30	
	50	87.449,70	65.001,40	54.129,40	43.471,30	
	60	87.373,70	58.060,50	44.568,30	39.757,20	



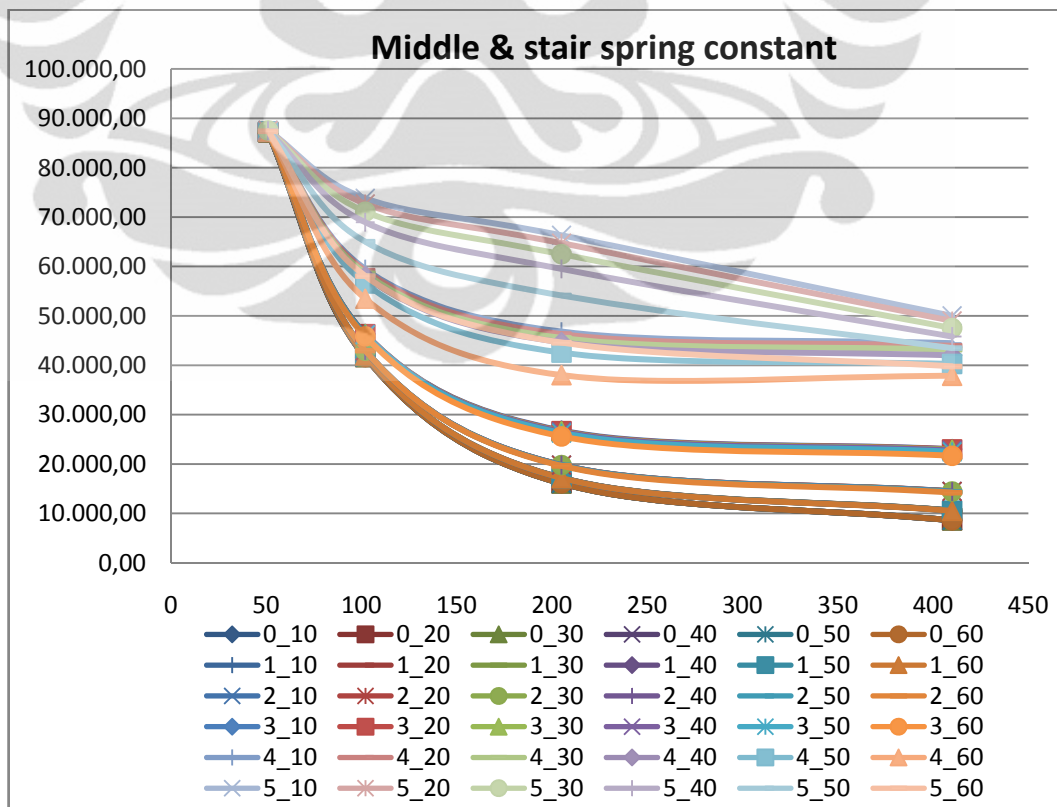
Grafik 5.23a Data rekap 6 μ m (1)



Grafik 5.23b Data rekap 6 μ m (2)



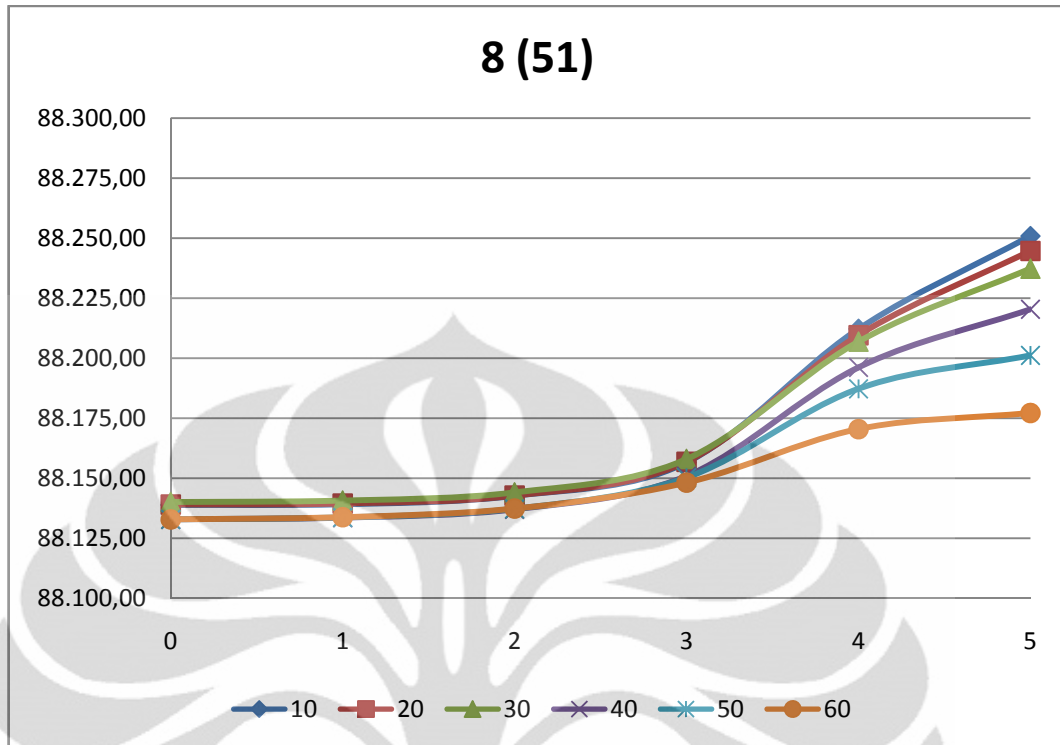
Grafik 5.23c Data rekap 6 μ m (3)



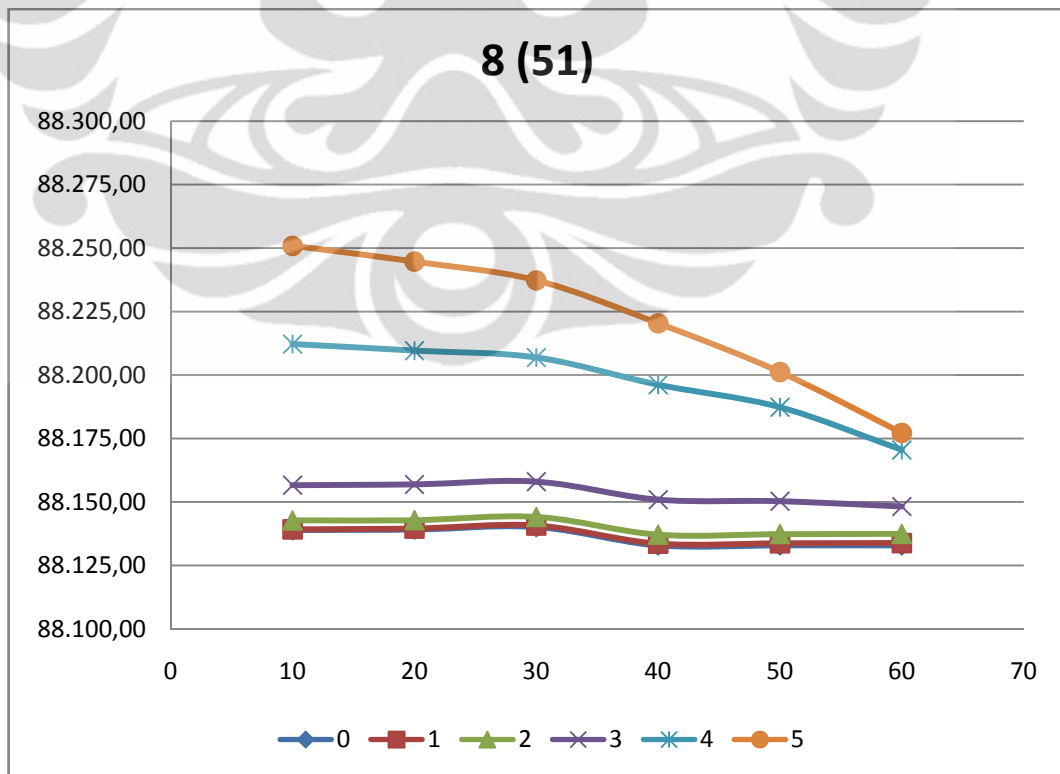
Grafik 5.23d Data rekap 6 μ m (4)

**Tabel 5.24a Data mentah, lebar spring 8 μ m, panjang beam tether 51 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8 (51)	10	0	88.138,90	88.808,40	88.829,90
		1	88.139,20	88.808,40	88.829,90
		2	88.142,70	88.808,50	88.829,90
		3	88.156,60	88.808,50	88.829,80
		4	88.212,20	88.809,60	88.829,80
		5	88.250,90	88.810,10	88.829,70
	20	0	88.139,10	88.808,50	88.826,60
		1	88.139,50	88.808,50	88.826,70
		2	88.142,80	88.808,50	88.826,70
		3	88.156,90	88.808,70	88.826,70
		4	88.209,60	88.809,30	88.826,70
		5	88.244,70	88.809,60	88.826,70
	30	0	88.140,10	88.807,90	88.826,30
		1	88.140,70	88.807,90	88.826,30
		2	88.144,10	88.808,00	88.826,30
		3	88.158,00	88.808,10	88.826,30
		4	88.206,90	88.808,60	88.826,30
		5	88.237,30	88.809,00	88.826,30
	40	0	88.132,90	88.535,90	88.780,10
		1	88.133,60	88.536,60	88.780,10
		2	88.137,10	88.537,40	88.780,10
		3	88.150,90	88.538,20	88.780,10
		4	88.196,20	88.538,90	88.780,10
		5	88.220,40	88.539,70	88.780,10
	50	0	88.132,90	88.531,30	88.779,80
		1	88.133,70	88.532,70	88.779,80
		2	88.137,30	88.533,60	88.779,80
		3	88.150,30	88.534,40	88.779,80
		4	88.187,30	88.534,60	88.779,80
		5	88.201,20	88.535,00	88.779,80
60	0	88.132,90	88.530,60	88.776,60	
	1	88.133,80	88.530,70	88.776,60	
	2	88.137,40	88.531,10	88.776,60	
	3	88.148,20	88.531,30	88.776,60	
	4	88.170,50	88.532,70	88.776,60	
	5	88.177,20	88.534,20	88.776,60	



Grafik 5.24a Data mentah, lebar spring 8µm, panjang beam tether 51µm (variasi middle spring dan stair spring)



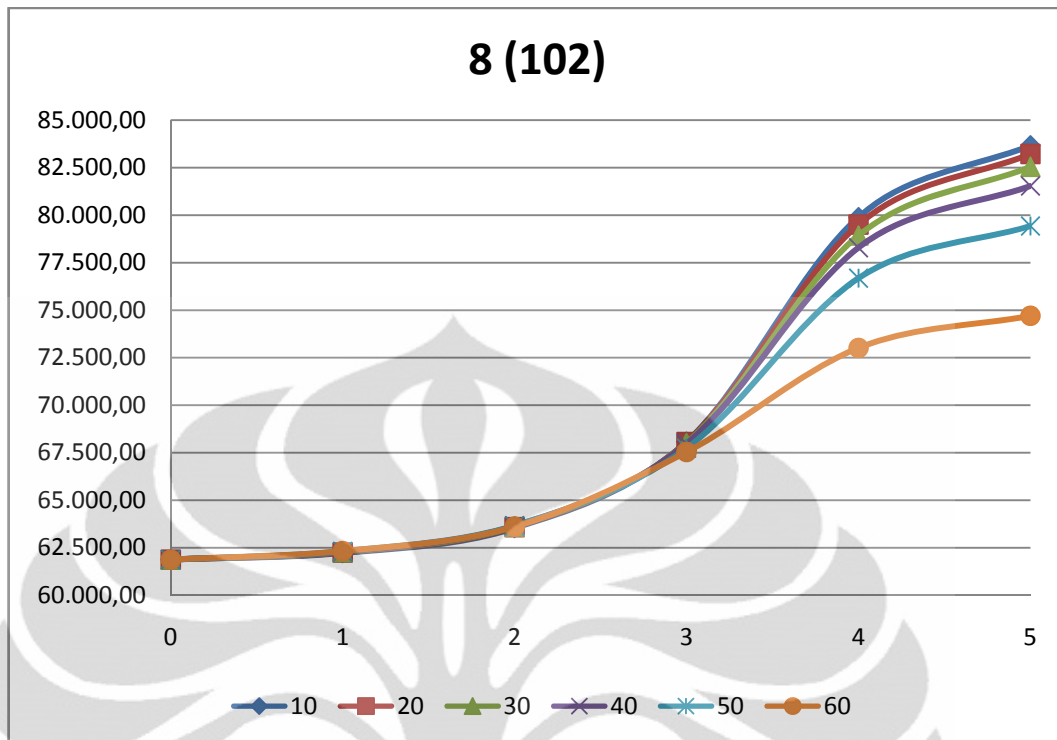
Grafik 5.24b Data olah, lebar spring 8µm, panjang beam tether 51µm (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.24b Data olah, lebar spring 8 μ m, panjang beam tether 51 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

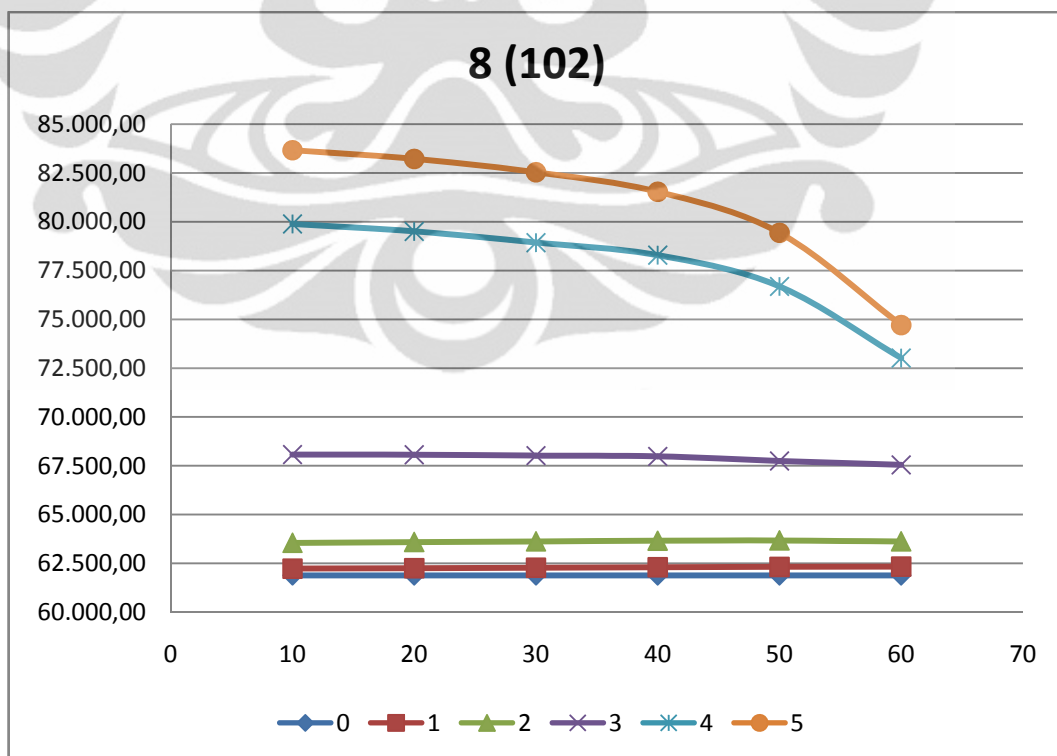
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8 (51)	0	10	88.138,90	88.808,40	88.829,90
		20	88.139,10	88.808,50	88.826,60
		30	88.140,10	88.807,90	88.826,30
		40	88.132,90	88.535,90	88.779,80
		50	88.132,90	88.531,30	88.829,80
		60	88.132,90	88.530,60	88.776,60
	1	10	88.139,20	88.808,40	88.829,90
		20	88.139,50	88.808,50	88.826,70
		30	88.140,70	88.807,90	88.826,30
		40	88.133,60	88.536,60	88.779,80
		50	88.133,70	88.532,70	88.779,80
		60	88.133,80	88.530,70	88.776,60
	2	10	88.142,70	88.808,50	88.829,90
		20	88.142,80	88.808,50	88.826,70
		30	88.144,10	88.808,00	88.826,30
		40	88.137,10	88.537,40	88.779,80
		50	88.137,30	88.533,60	88.779,80
		60	88.137,40	88.531,10	88.776,60
	3	10	88.156,60	88.808,50	88.829,80
		20	88.156,90	88.808,70	88.826,70
		30	88.158,00	88.808,10	88.826,30
		40	88.150,90	88.538,20	88.779,80
		50	88.150,30	88.534,40	88.779,80
		60	88.148,20	88.531,30	88.776,60
	4	10	88.212,20	88.809,60	88.829,80
		20	88.209,60	88.809,30	88.826,70
		30	88.206,90	88.808,60	88.826,30
		40	88.196,20	88.538,90	88.779,80
		50	88.187,30	88.534,60	88.779,80
		60	88.170,50	88.532,70	88.776,60
5	10	88.250,90	88.810,10	88.829,70	
	20	88.244,70	88.809,60	88.826,70	
	30	88.237,30	88.809,00	88.826,30	
	40	88.220,40	88.539,70	88.779,80	
	50	88.201,20	88.535,00	88.779,80	
	60	88.177,20	88.534,20	88.776,60	

**Tabel 5.25a Data mentah, lebar spring 8 μ m, panjang beam tether 102 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8 (102)	10	0	61.882,20	88.205,00	88.788,10
		1	62.229,10	88.206,00	88.792,10
		2	63.547,10	88.207,60	88.796,80
		3	68.074,50	88.207,60	88.795,30
		4	79.890,60	88.208,10	88.797,20
		5	83.668,40	88.208,30	88.798,10
	20	0	61.882,30	88.179,60	88.793,10
		1	62.253,10	88.180,30	88.791,10
		2	63.587,10	88.182,20	88.794,70
		3	68.065,70	88.188,20	88.787,80
		4	79.508,80	88.209,60	88.791,70
		5	83.223,30	88.210,00	88.793,80
	30	0	61.882,40	88.156,50	88.787,80
		1	62.276,20	88.157,20	88.796,10
		2	63.622,20	88.162,30	88.795,70
		3	68.020,70	88.165,20	88.793,50
		4	78.935,20	88.187,70	88.787,30
		5	82.541,90	88.202,60	88.790,20
	40	0	61.882,30	88.137,20	88.825,60
		1	62.299,50	88.137,90	88.828,50
		2	63.658,70	88.139,80	88.827,70
		3	67.980,30	88.145,90	88.828,20
		4	78.292,10	88.166,90	88.826,10
		5	81.541,20	88.179,40	88.826,30
	50	0	61.882,40	88.122,00	88.828,30
		1	62.319,50	88.122,10	88.823,20
		2	63.669,90	88.124,20	88.823,50
		3	67.745,20	88.130,20	88.828,00
		4	76.689,10	88.148,20	88.826,70
		5	79.436,40	88.156,30	88.826,90
60	0	61.882,40	88.111,20	88.827,60	
	1	62.334,60	88.111,50	88.825,00	
	2	63.621,50	88.113,40	88.826,90	
	3	67.546,50	88.118,30	88.826,80	
	4	73.018,60	88.129,80	88.825,20	
	5	74.710,50	88.194,00	88.888,00	



Grafik 5.25a Data mentah, lebar spring 8µm, panjang beam tether 102µm (variasi middle spring dan stair spring)



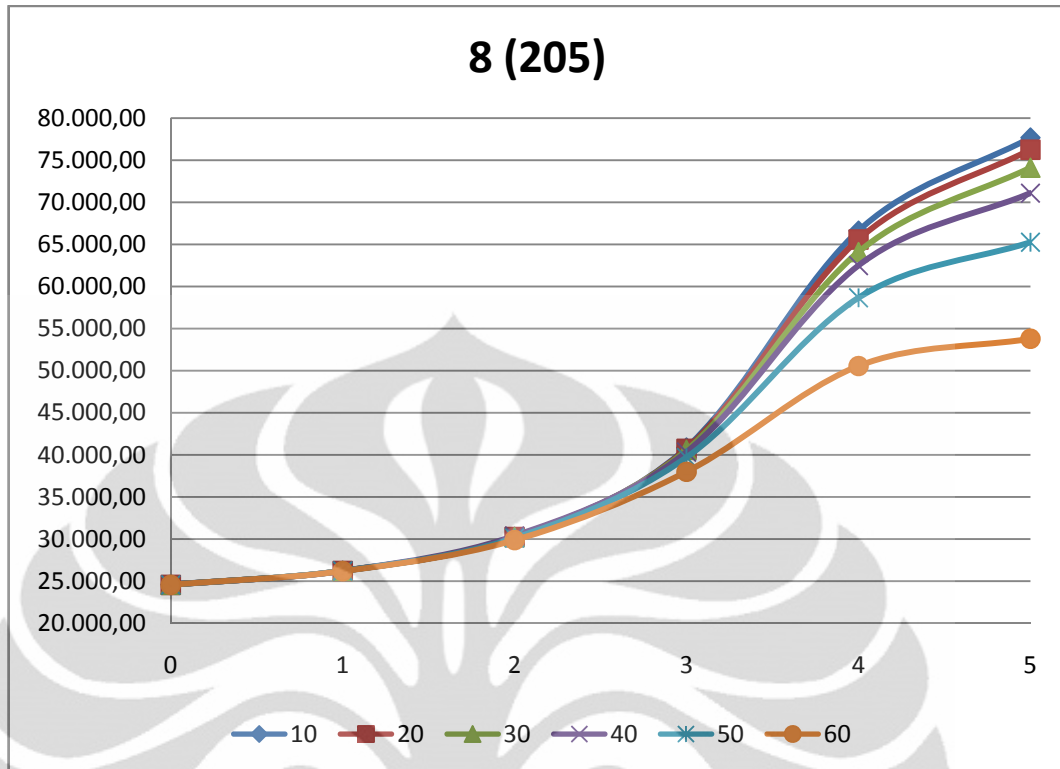
Grafik 5.25b Data olah, lebar spring 8µm, panjang beam tether 102µm (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.25b Data olah, lebar spring 8 μ m, panjang beam tether 102 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

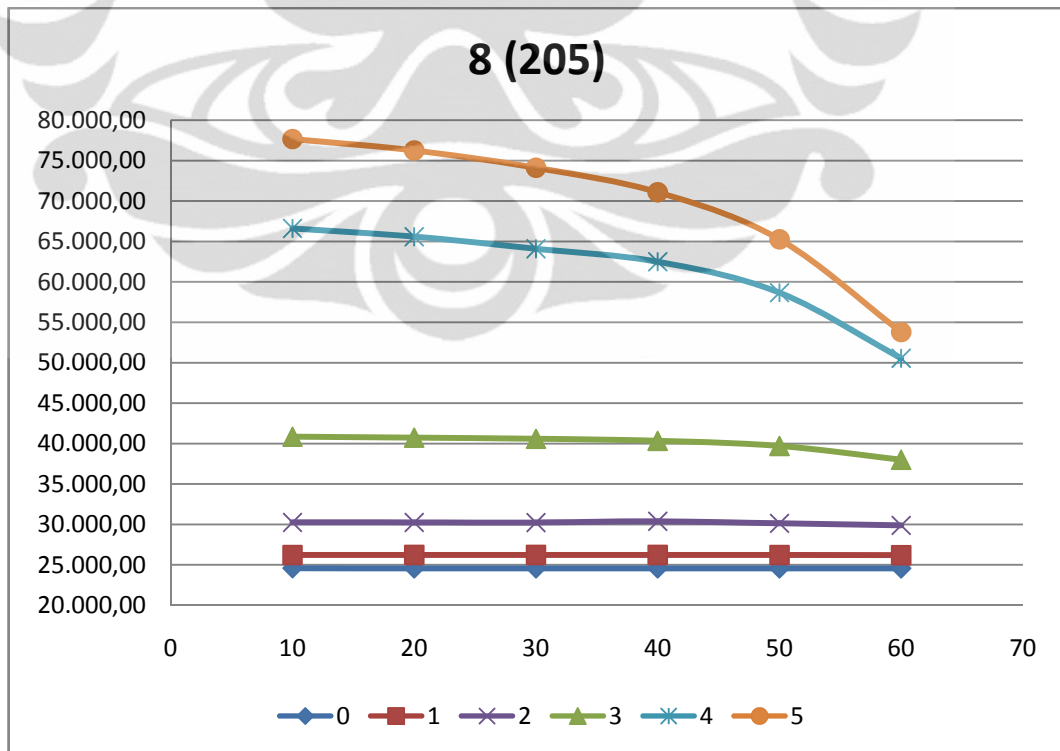
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8 (102)	0	10	61.882,20	88.205,00	88.788,10
		20	61.882,30	88.179,60	88.793,10
		30	61.882,40	88.156,50	88.787,80
		40	61.882,30	88.137,20	88.825,60
		50	61.882,40	88.122,00	88.828,30
		60	61.882,40	88.111,20	88.827,60
	1	10	62.229,10	88.206,00	88.792,10
		20	62.253,10	88.180,30	88.791,10
		30	62.276,20	88.157,20	88.796,10
		40	62.299,50	88.137,90	88.828,50
		50	62.319,50	88.122,10	88.823,20
		60	62.334,60	88.111,50	88.825,00
	2	10	63.547,10	88.207,60	88.796,80
		20	63.587,10	88.182,20	88.794,70
		30	63.622,20	88.162,30	88.795,70
		40	63.658,70	88.139,80	88.827,70
		50	63.669,90	88.124,20	88.823,50
		60	63.621,50	88.113,40	88.826,90
	3	10	68.074,50	88.207,60	88.795,30
		20	68.065,70	88.188,20	88.787,80
		30	68.020,70	88.165,20	88.793,50
		40	67.980,30	88.145,90	88.828,20
		50	67.745,20	88.130,20	88.828,00
		60	67.546,50	88.118,30	88.826,80
	4	10	79.890,60	88.208,10	88.797,20
		20	79.508,80	88.209,60	88.791,70
		30	78.935,20	88.187,70	88.787,30
		40	78.292,10	88.166,90	88.826,10
		50	76.689,10	88.148,20	88.826,70
		60	73.018,60	88.129,80	88.825,20
5	10	83.668,40	88.208,30	88.798,10	
	20	83.223,30	88.210,00	88.793,80	
	30	82.541,90	88.202,60	88.790,20	
	40	81.541,20	88.179,40	88.826,30	
	50	79.436,40	88.156,30	88.826,90	
	60	74.710,50	88.194,00	88.888,00	

**Tabel 5.26a Data mentah, lebar spring 8 μ m, panjang beam tether 205 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8 (205)	10	0	24.587,40	87.570,70	87.905,10
		1	26.219,40	86.069,50	87.503,70
		2	30.254,00	85.945,30	87.511,50
		3	40.855,10	85.897,40	87.536,80
		4	66.622,20	85.958,00	87.627,40
		5	77.679,20	86.173,60	87.690,90
	20	0	24.568,20	86.137,20	87.382,80
		1	26.224,80	86.056,80	87.385,70
		2	30.251,30	85.955,80	87.394,80
		3	40.732,70	85.916,80	87.423,40
		4	65.595,70	85.975,60	87.525,00
		5	76.262,70	86.181,30	87.592,00
	30	0	24.568,20	86.084,10	87.266,20
		1	26.227,20	86.032,40	87.269,30
		2	30.234,60	85.954,20	87.279,10
		3	40.593,30	87.957,40	88.792,60
		4	64.102,30	85.980,00	87.421,30
		5	74.116,20	86.172,90	87.488,00
	40	0	24.568,40	86.022,40	87.156,80
		1	26.230,50	85.994,30	87.159,90
		2	30.388,20	86.301,30	87.227,30
		3	40.338,70	85.919,40	87.203,40
		4	62.497,10	85.975,10	87.314,40
		5	71.096,50	86.171,10	87.378,80
	50	0	24.568,40	85.993,70	87.065,00
		1	26.222,40	85.928,40	87.068,40
		2	30.138,30	85.894,90	87.079,00
		3	39.703,00	85.882,90	87.114,70
		4	58.672,50	85.930,90	87.216,20
		5	65.269,80	86.100,90	87.264,70
60	0	24.568,50	85.817,80	86.998,50	
	1	26.197,90	85.830,20	87.002,10	
	2	29.883,80	85.816,70	87.013,40	
	3	37.997,30	85.812,60	87.046,10	
	4	50.563,20	85.848,90	87.112,80	
	5	53.800,10	85.980,80	87.134,10	



Grafik 5.26a Data mentah, lebar spring 8µm, panjang beam tether 205µm (variasi middle spring dan stair spring)



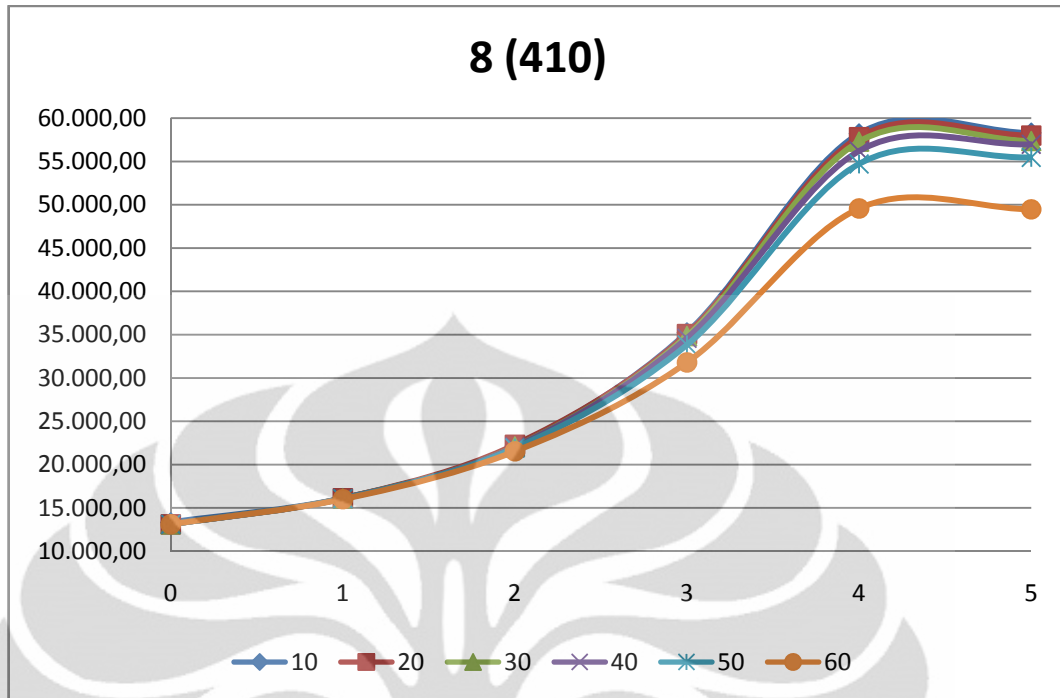
Grafik 5.26b Data olah, lebar spring 8µm, panjang beam tether 205µm (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.26b Data olah, lebar spring 8 μ m, panjang beam tether 205 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

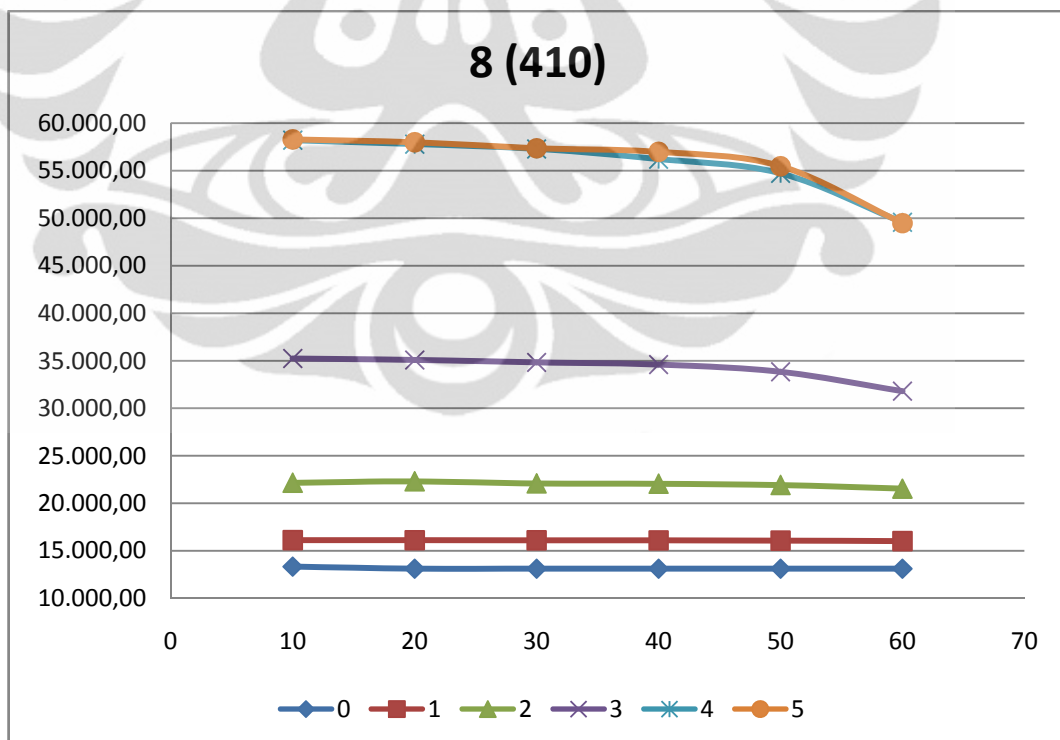
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8 (205)	0	10	24.587,40	87.570,70	87.905,10
		20	24.568,20	86.137,20	87.382,80
		30	24.568,20	86.084,10	87.266,20
		40	24.568,40	86.022,40	87.156,80
		50	24.568,40	85.993,70	87.065,00
		60	24.568,50	85.817,80	86.998,50
	1	10	26.219,40	86.069,50	87.503,70
		20	26.224,80	86.056,80	87.385,70
		30	26.227,20	86.032,40	87.269,30
		40	26.230,50	85.994,30	87.159,90
		50	26.222,40	85.928,40	87.068,40
		60	26.197,90	85.830,20	87.002,10
	2	10	30.254,00	85.945,30	87.511,50
		20	30.251,30	85.955,80	87.394,80
		30	30.234,60	85.954,20	87.279,10
		40	30.388,20	86.301,30	87.227,30
		50	30.138,30	85.894,90	87.079,00
		60	29.883,80	85.816,70	87.013,40
	3	10	40.855,10	85.897,40	87.536,80
		20	40.732,70	85.916,80	87.423,40
		30	40.593,30	87.957,40	88.792,60
		40	40.338,70	85.919,40	87.203,40
		50	39.703,00	85.882,90	87.114,70
		60	37.997,30	85.812,60	87.046,10
	4	10	66.622,20	85.958,00	87.627,40
		20	65.595,70	85.975,60	87.525,00
		30	64.102,30	85.980,00	87.421,30
		40	62.497,10	85.975,10	87.314,40
		50	58.672,50	85.930,90	87.216,20
		60	50.563,20	85.848,90	87.112,80
5	10	77.679,20	86.173,60	87.690,90	
	20	76.262,70	86.181,30	87.592,00	
	30	74.116,20	86.172,90	87.488,00	
	40	71.096,50	86.171,10	87.378,80	
	50	65.269,80	86.100,90	87.264,70	
	60	53.800,10	85.980,80	87.134,10	

**Tabel 5.27a Data mentah, lebar spring 8 μ m, panjang beam tether 410 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

Width	Middle spring	Stair spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8 (410)	10	0	13.336,20	58.124,50	59.288,40
		1	16.121,90	57.381,20	58.733,00
		2	22.148,90	57.631,90	58.675,60
		3	35.242,60	57.958,20	58.653,20
		4	58.211,50	58.732,20	60.970,00
		5	58.298,60	58.987,70	61.956,10
	20	0	13.117,50	56.845,10	57.225,00
		1	16.117,10	56.964,60	57.872,30
		2	22.301,00	57.798,20	58.937,30
		3	35.084,60	57.488,50	57.866,40
		4	57.799,90	58.945,30	59.413,00
		5	57.994,50	59.045,50	60.523,90
	30	0	13.117,50	55.508,90	56.506,00
		1	16.107,50	55.568,20	56.614,20
		2	22.084,10	55.725,20	56.814,00
		3	34.831,80	56.209,30	57.079,40
		4	57.294,90	57.801,40	58.505,20
		5	57.368,00	58.733,00	58.794,70
	40	0	13.118,30	53.940,60	56.225,80
		1	16.100,20	53.994,70	56.320,90
		2	22.050,50	54.147,50	56.489,40
		3	34.599,10	54.367,10	56.717,10
		4	56.216,10	56.920,00	58.421,40
		5	56.988,00	57.150,10	58.652,60
	50	0	13.118,40	52.647,90	56.024,00
		1	16.073,10	52.705,80	56.107,70
		2	21.914,40	52.869,80	56.244,30
		3	33.839,40	53.376,90	56.430,30
		4	54.720,90	54.793,80	56.614,20
		5	55.476,80	56.675,70	58.490,80
60	0	13.118,40	51.727,10	55.891,10	
	1	16.018,50	51.789,20	55.965,20	
	2	21.540,20	51.954,90	56.071,20	
	3	31.805,10	52.406,60	56.216,10	
	4	49.578,20	53.314,50	56.384,10	
	5	49.480,70	53.607,70	56.465,00	



Grafik 5.27a Data mentah, lebar spring $8\mu\text{m}$, panjang beam tether $410\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)



Grafik 5.27b Data olah, lebar spring $8\mu\text{m}$, panjang beam tether $410\mu\text{m}$ (variasi middle spring dan stair spring)

**Tabel 5.27b Data olah, lebar spring 8 μ m, panjang beam tether 410 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

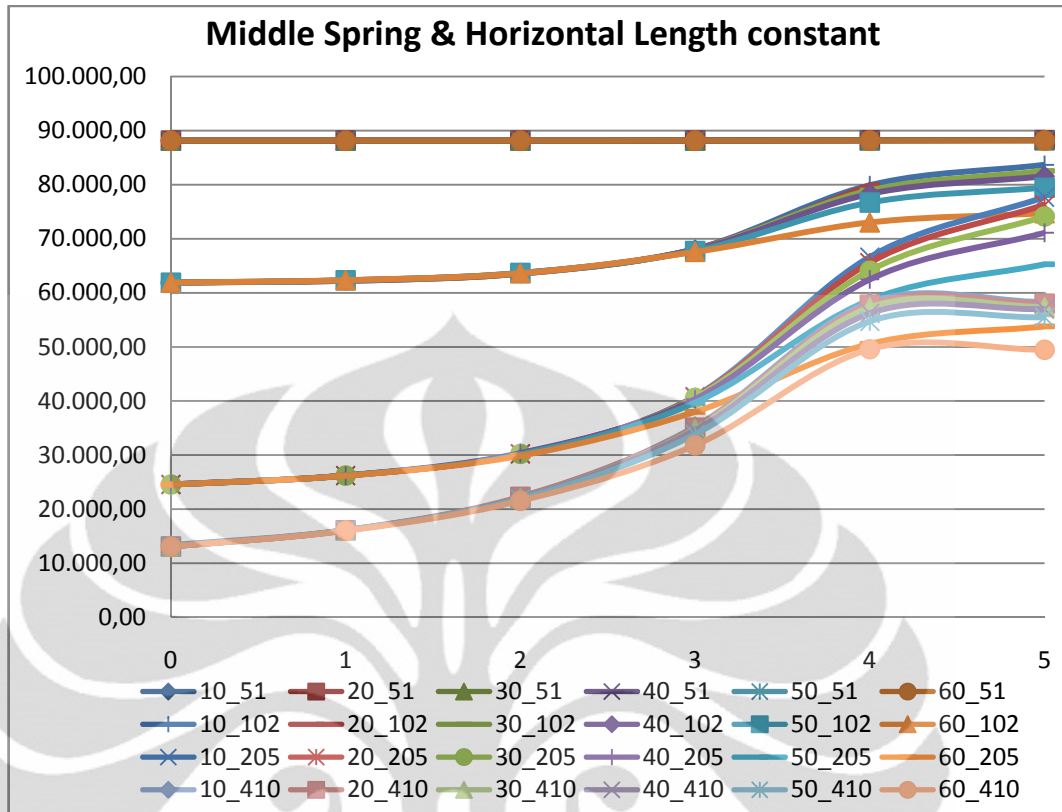
Width	Star Spring	Middle Spring	fnatural 1	fnatural 2	fnatural 3
8 (410)	0	10	13.336,20	58.124,50	59.288,40
		20	13.117,50	56.845,10	57.225,00
		30	13.117,50	55.508,90	56.506,00
		40	13.118,30	53.940,60	56.225,80
		50	13.118,40	52.647,90	56.024,00
		60	13.118,40	51.727,10	55.891,10
	1	10	16.121,90	57.381,20	58.733,00
		20	16.117,10	56.964,60	57.872,30
		30	16.107,50	55.568,20	56.614,20
		40	16.100,20	53.994,70	56.320,90
		50	16.073,10	52.705,80	56.107,70
		60	16.018,50	51.789,20	55.965,20
	2	10	22.148,90	57.631,90	58.675,60
		20	22.301,00	57.798,20	58.937,30
		30	22.084,10	55.725,20	56.814,00
		40	22.050,50	54.147,50	56.489,40
		50	21.914,40	52.869,80	56.244,30
		60	21.540,20	51.954,90	56.071,20
	3	10	35.242,60	57.958,20	58.653,20
		20	35.084,60	57.488,50	57.866,40
		30	34.831,80	56.209,30	57.079,40
		40	34.599,10	54.367,10	56.717,10
		50	33.839,40	53.376,90	56.430,30
		60	31.805,10	52.406,60	56.216,10
	4	10	58.211,50	58.732,20	60.970,00
		20	57.799,90	58.945,30	59.413,00
		30	57.294,90	57.801,40	58.505,20
		40	56.216,10	56.920,00	58.421,40
		50	54.720,90	54.793,80	56.614,20
		60	49.578,20	53.314,50	56.384,10
5	10	58.298,60	58.987,70	61.956,10	
	20	57.994,50	59.045,50	60.523,90	
	30	57.368,00	58.733,00	58.794,70	
	40	56.988,00	57.150,10	58.652,60	
	50	55.476,80	56.675,70	58.490,80	
	60	49.480,70	53.607,70	56.465,00	

**Tabel 5.28a Data mentah rekap 8 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

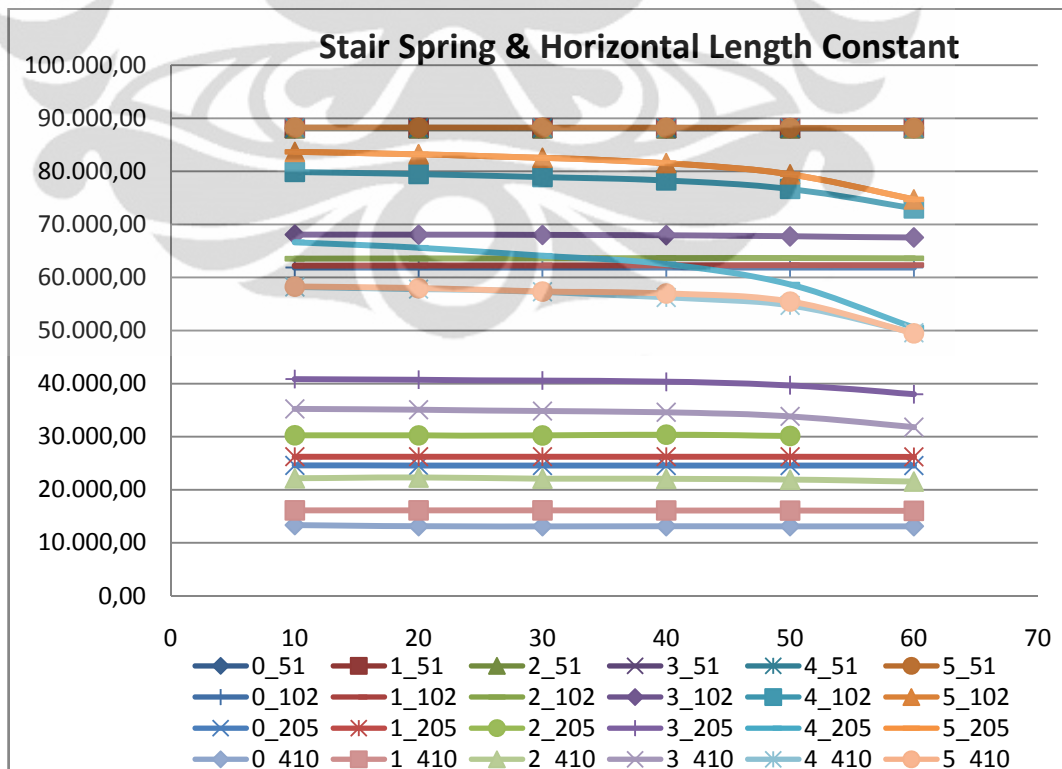
width	Middle spring	Stair spring	fnatural (mode 1)			
			51,00	102,00	205,00	410,00
8	10	0	88.138,90	61.882,20	24.587,40	13.336,20
		1	88.139,20	62.229,10	26.219,40	16.121,90
		2	88.142,70	63.547,10	30.254,00	22.148,90
		3	88.156,60	68.074,50	40.855,10	35.242,60
		4	88.212,20	79.890,60	66.622,20	58.211,50
		5	88.250,90	83.668,40	77.679,20	58.298,60
	20	0	88.139,10	61.882,30	24.568,20	13.117,50
		1	88.139,50	62.253,10	26.224,80	16.117,10
		2	88.142,80	63.587,10	30.251,30	22.301,00
		3	88.156,90	68.065,70	40.732,70	35.084,60
		4	88.209,60	79.508,80	65.595,70	57.799,90
		5	88.244,70	83.223,30	76.262,70	57.994,50
	30	0	88.140,10	61.882,40	24.568,20	13.117,50
		1	88.140,70	62.276,20	26.227,20	16.107,50
		2	88.144,10	63.622,20	30.234,60	22.084,10
		3	88.158,00	68.020,70	40.593,30	34.831,80
		4	88.206,90	78.935,20	64.102,30	57.294,90
		5	88.237,30	82.541,90	74.116,20	57.368,00
	40	0	88.132,90	61.882,30	24.568,40	13.118,30
		1	88.133,60	62.299,50	26.230,50	16.100,20
		2	88.137,10	63.658,70	30.388,20	22.050,50
		3	88.150,90	67.980,30	40.338,70	34.599,10
		4	88.196,20	78.292,10	62.497,10	56.216,10
		5	88.220,40	81.541,20	71.096,50	56.988,00
	50	0	88.132,90	61.882,40	24.568,40	13.118,40
		1	88.133,70	62.319,50	26.222,40	16.073,10
		2	88.137,30	63.669,90	30.138,30	21.914,40
		3	88.150,30	67.745,20	39.703,00	33.839,40
		4	88.187,30	76.689,10	58.672,50	54.720,90
		5	88.201,20	79.436,40	65.269,80	55.476,80
60	0	88.132,90	61.882,40	24.568,50	13.118,40	
	1	88.133,80	62.334,60	26.197,90	16.018,50	
	2	88.137,40	63.621,50	29.883,80	21.540,20	
	3	88.148,20	67.546,50	37.997,30	31.805,10	
	4	88.170,50	73.018,60	50.563,20	49.578,20	
	5	88.177,20	74.710,50	53.800,10	49.480,70	

**Tabel 5.28b Data olah rekap 8 μ m
(variasi middle spring dan stair spring)**

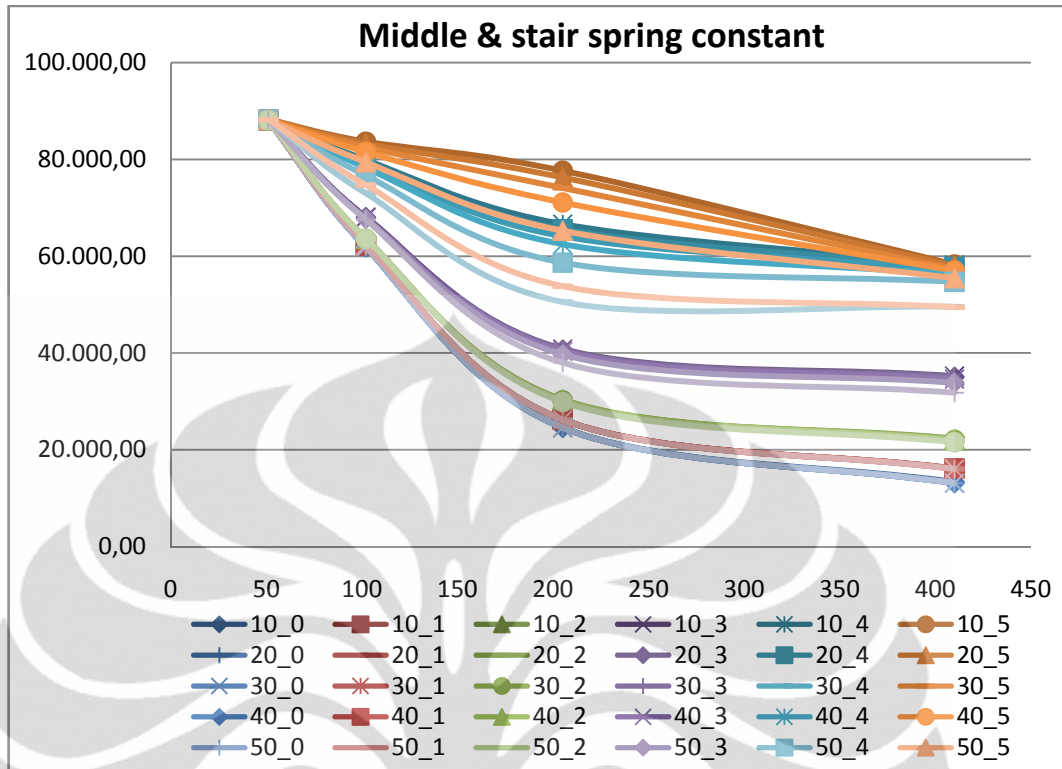
width	Middle spring	Stair spring	fnatural (mode 1)			
			51,00	102,00	205,00	410,00
8	0	10	88.138,90	61.882,20	24.587,40	13.336,20
		20	88.139,10	61.882,30	24.568,20	13.117,50
		30	88.140,10	61.882,40	24.568,20	13.117,50
		40	88.132,90	61.882,30	24.568,40	13.118,30
		50	88.132,90	61.882,40	24.568,40	13.118,40
		60	88.132,90	61.882,40	24.568,50	13.118,40
	1	10	88.139,20	62.229,10	26.219,40	16.121,90
		20	88.139,50	62.253,10	26.224,80	16.117,10
		30	88.140,70	62.276,20	26.227,20	16.107,50
		40	88.133,60	62.299,50	26.230,50	16.100,20
		50	88.133,70	62.319,50	26.222,40	16.073,10
		60	88.133,80	62.334,60	26.197,90	16.018,50
	2	10	88.142,70	63.547,10	30.254,00	22.148,90
		20	88.142,80	63.587,10	30.251,30	22.301,00
		30	88.144,10	63.622,20	30.234,60	22.084,10
		40	88.137,10	63.658,70	30.388,20	22.050,50
		50	88.137,30	63.669,90	30.138,30	21.914,40
		60	88.137,40	63.621,50	29.883,80	21.540,20
	3	10	88.156,60	68.074,50	40.855,10	35.242,60
		20	88.156,90	68.065,70	40.732,70	35.084,60
		30	88.158,00	68.020,70	40.593,30	34.831,80
		40	88.150,90	67.980,30	40.338,70	34.599,10
		50	88.150,30	67.745,20	39.703,00	33.839,40
		60	88.148,20	67.546,50	37.997,30	31.805,10
	4	10	88.212,20	79.890,60	66.622,20	58.211,50
		20	88.209,60	79.508,80	65.595,70	57.799,90
		30	88.206,90	78.935,20	64.102,30	57.294,90
		40	88.196,20	78.292,10	62.497,10	56.216,10
		50	88.187,30	76.689,10	58.672,50	54.720,90
		60	88.170,50	73.018,60	50.563,20	49.578,20
5	10	88.250,90	83.668,40	77.679,20	58.298,60	
	20	88.244,70	83.223,30	76.262,70	57.994,50	
	30	88.237,30	82.541,90	74.116,20	57.368,00	
	40	88.220,40	81.541,20	71.096,50	56.988,00	
	50	88.201,20	79.436,40	65.269,80	55.476,80	
	60	88.177,20	74.710,50	53.800,10	49.480,70	



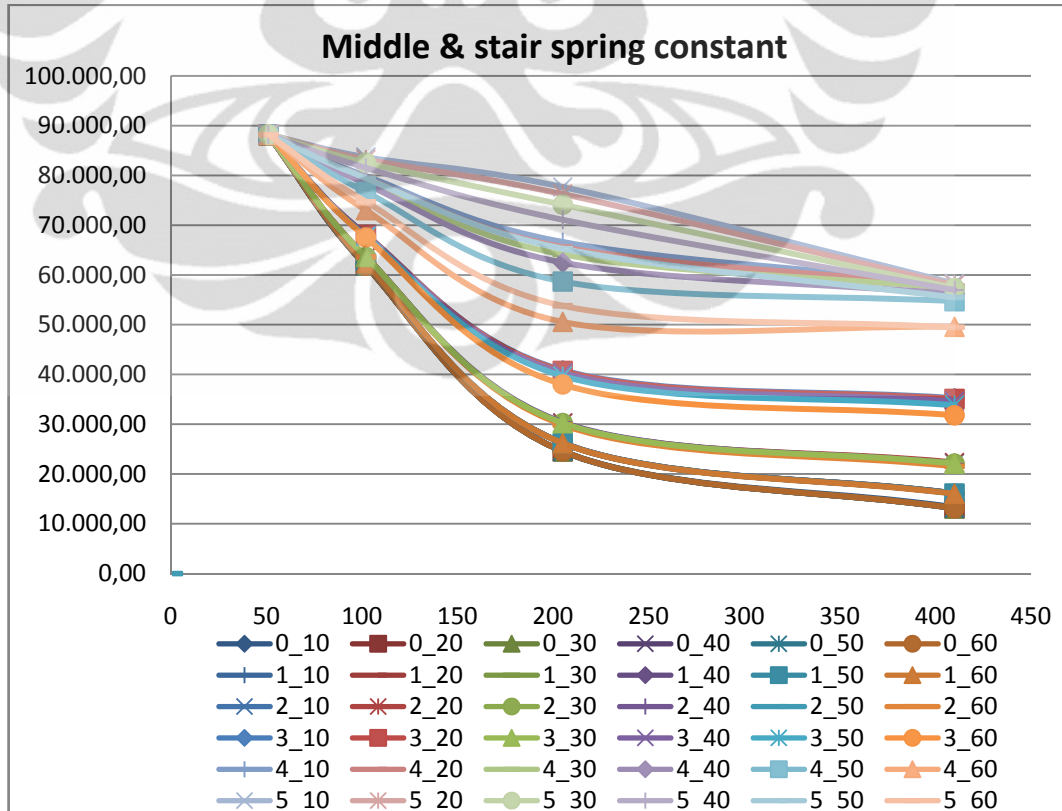
Grafik 5.29a Data rekap 8 μ m (1)



Grafik 5.29b Data rekap 8 μ m (2)



Grafik 5.29c Data rekap 8 μ m (3)



Grafik 5.29d Data rekap 8 μ m (4)