

**KAJIAN CANGKANG VIRUS DALAM TINJAUAN  
FISIKA DENGAN MENGGUNAKAN SOLUSI  
PERSAMAAN MICHELL**



**OLEH**

**MOHAMMAD RIZKI FAUZI**

**1713021043**

**JURUSAN FISIKA DAN PENGAJARAN IPA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS PENDIDIKAN GANESHA  
SINGARAJA  
2021**

**KAJIAN CANGKANG VIRUS DALAM TINJAUAN  
FISIKA DENGAN MENGGUNAKAN SOLUSI  
PERSAMAAN MICHELL**

**SKRIPSI**

**Diajukan kepada**

**Universitas Pendidikan Ganesha**

**Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam Menyelesaikan**

**Program Sarjana Pendidikan Fisika**



**Oleh**

**Mohammad Rizki Fauzi**

**NIM 1713021043**

**JURUSAN FISIKA DAN PENGAJARAN IPA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS PENDIDIKAN GANESHA  
SINGARAJA**

**2021**

**SKRIPSI**

**DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI TUGAS  
DAN MEMENUHI SYARAT-SYARAT UNTUK  
MENCAPAI GELAR SARJANA PENDIDIKAN**

**Menyetujui**

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. I Gede Aris Gunadi, S.Si., M.Kom. Dr. Luh Putu Budi Yasmini, S.Pd., M.Sc.

NIP. 197703182008121004

NIP. 198402222009122008

Skripsi oleh Mohammad Rizki Fauzi ini  
telah dipertahankan di depan dewan penguji pada  
pada tanggal 16 Juli 2021  
Dewan Penguji,



Dr. I Gede Aris Gunadi, S.Si., M.Kom  
NIP. 197703182008121004

(Ketua)



Dr. Luh Putu Budi Yasmini, S.Pd., M.Sc  
NIP. 198402222009122008

(Anggota)



Dr. Putu Artawan, S.Pd., M, Si  
NIP. 197912202006041001

(Anggota)



Putu Widiarini, S.Pd., M.Pd., M.Sc.  
NIP. 198903272019032020

(Anggota)

Diterima oleh Panitia Ujian Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Pendidikan Ganesha  
guna memenuhi syarat-syarat untuk mencapai gelar sarjana pendidikan  
Pada:

Hari : Jumat

Tanggal : 16 Juli 2021

Mengetahui,

Ketua Ujian,



Dr. Wayan Sukra Wargala, S.Pd., M.Sc.  
NIP. 19670131 199403 1 001

Sekretaris Ujian,



Dr. Ida Bagus Putu Mardana, M.Si.  
NIP. 19640827 199102 1 001

Mengesahkan  
Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Prof. Dr. I Nengah Suparta, M.Si.  
NIP. 19650711 199003 1 003

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa karya tulis yang berjudul “KAJIAN CANGKANG VIRUS DALAM TINJAUAN FISIKA DENGAN MENGGUNAKAN SOLUSI PERSAMAAN MICHELL” beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan dan pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi yang dijatuhkan kepada saya apabila kemudian ditemukan adanya pelanggaran atas etika keilmuan dalam karya saya ini atau ada klaim terhadap keaslian karya saya ini.

Singaraja, Juli 2021



Penulis



***DIPERSEMBAHKAN KEPADA IBUNDA TERCINTA***

***Terima kasih atas dukungan dan doa yang selalu dipanjatkan untuk  
kesuksesan anakmu, dan***

***Tidak lupa juga untuk semua guru-guruku atas ilmu yang tak  
ternilai harganya.***

## PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmatnya, penulis dapat menyelesaikan tugas skripsi yang berjudul “**Kajian Cangkang Virus dalam Tinjauan Fisika dengan Menggunakan Solusi Persamaan Michell**”. Penulis sangat berterima kasih kepada Bapak Dr. I Gede Aris Gunadi, S.Si., M.Kom, selaku pembimbing I, Ibu Dr. Luh Putu Budi Yasmini, S.Pd., M.Sc, selaku pembimbing II, dan Ibu Dr. Nurfa Risha, S.Si., M.Sc. selaku pembimbing.

Terima kasih juga disampaikan kepada seluruh dosen Pendidikan Fisika di Universitas Pendidikan Ganesha atas segala perhatiannya selama penulis menjalankan kuliah pada program studi Pendidikan Fisika. Terima kasih kepada Ibuk Suci yang telah berkenan menyelesaikan persoalan mengenai administrasi penulis.

Terima kasih disampaikan kepada ibunda tercinta atas dukungan, doanya yang muarab, dan motivasi yang telah diberikan selama ini, sehingga anakmu ini konsisten mempelajari topik ini, dan terima kasih kepada buk purwanti sebagai pembaca setia. Terima kasih juga disampaikan kepada teman-teman di jurusan Pendidikan Fisika atas segala dukungannya khususnya kak Rai, kak Vina, Alit, serta teman-teman saya, kakak tingkat, dan adik tingkat lainnya yang tidak bisa saya sampaikan satu persatu yang pastinya merupakan panutan saya.

Singaraja, Juli 2021

Penulis



# KAJIAN CANGKANG VIRUS DALAM TINJAUAN FISIKA DENGAN MENGUNAKAN SOLUSI PERSAMAAN MICHELL

Oleh

Mohammad Rizki Fauzi, NIM 1713021043

Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas MIPA, UNDIKSHA Singaraja

## ABSTRAK

Virus memiliki kekakuan/konstanta elastisitas cangkang yang berbeda-beda untuk setiap jenis virus baik itu cangkang kapsid maupun lipid. Untuk mengetahui kekakuan cangkang virus dapat dilakukan dengan *Atomic Force Microscopy* (AFM), dengan mengasumsikan cangkang sebagai sebuah pegas. Berdasarkan metode AFM mencari nilai kekakuan cangkang dengan menentukan nilai kekakuan efektif dan *cantilever*. Pada penelitian ini untuk menghitung kekakuan cangkang digunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA), *plate & shell theory*, dan dengan menggunakan metode lain yaitu solusi persamaan Michell.

Menghitung nilai kekakuan cangkang dengan meninjau lempengan yang dimiliki cangkang. Kemudian dengan mengaitkan fungsi tegangan *airy* ( $\phi$ ) untuk kasus lempengan berdasar solusi persamaan Michell dan mengkalkulasikan persamaan tensor tegangan tangensial. Persamaan tensor tegangan tangensial ini dikaitkan terhadap persamaan mengenai keterkaitan antara tekanan dan tensor tegangan.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini didapatkan bahwa dengan menggunakan solusi persamaan Michell untuk menghitung nilai kekakuan cangkang lebih berimpit terhadap hasil FEA dibandingkan dengan menggunakan *plate & shell theory*. Hasil nilai kekakuan cangkang dengan menggunakan solusi persamaan Michell tidak jauh berbeda dengan menggunakan *plate & shell theory*.

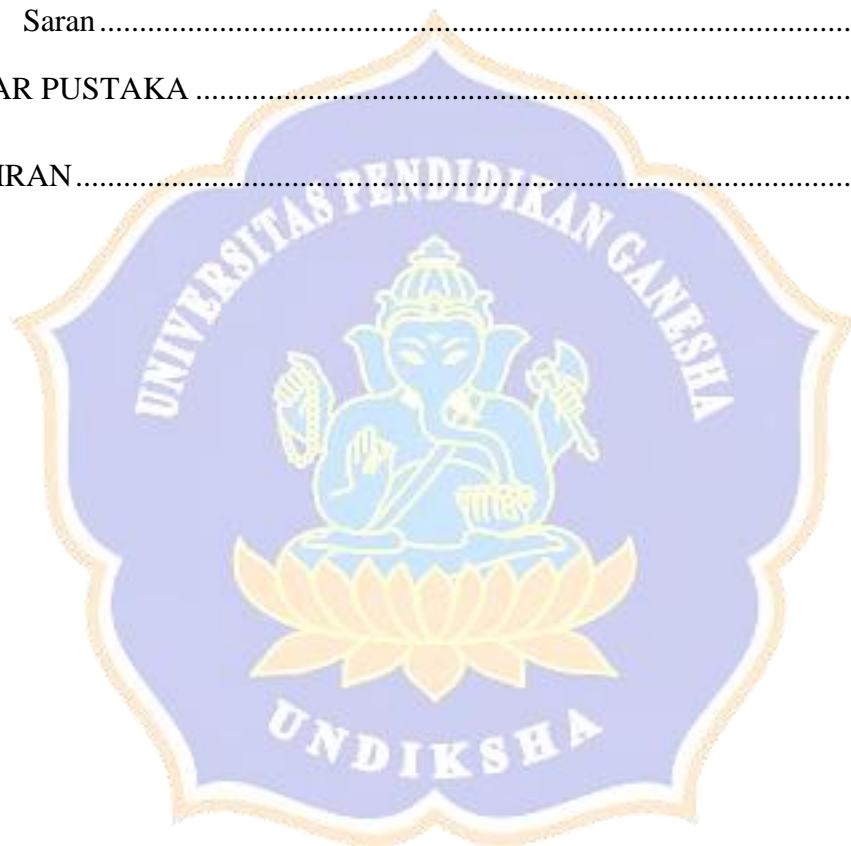
Kata Kunci : cangkang virus, kekakuan, lempengan, solusi persamaan Michell, *plate & shell theory* dan FEA.

## DAFTAR ISI

PRAKATA.....	i
ABSTRAK.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
TATA NAMA NOTASI DALAM SKRIPSI.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Struktur Penulisan.....	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA.....	7
2.1 Virus.....	7
2.1.1 Virus Amplop ( <i>Enveloped Virus</i> ).....	8
2.1.2 Virus Tanpa Amplop/Selubung (lapisan terluar virus) (Non- Enveloped Virus).....	9
2.2 <i>Atomic Force Microscopy</i> (AFM).....	10
2.2.1 Gambaran Umum AFM.....	10
2.2.2 Sifat Mekanik Virus.....	13

2.3	Keterkaitan Bilangan Triangulasi dan Bilangan Bulat Eisenstein ( <i>Eisenstein Integers</i> ).....	21
2.4	<i>Plane Stress &amp; Plane Strain</i> .....	30
2.4.1	Regangan Bidang ( <i>Plane Strain</i> ).....	32
2.4.2	Tegangan Bidang ( <i>Plane Stress</i> ).....	37
2.4.3	Solusi Michell.....	47
2.5	<i>Plate &amp; Shell Theory</i> .....	51
BAB 3	METODE PENELITIAN.....	59
3.1	Desain Penelitian.....	59
3.2	Sumber Data.....	65
3.3	Variabel Penelitian.....	65
3.4	Analisis Data.....	66
BAB 4	HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	68
4.1	Analisa Hasil Perhitungan Analitik.....	68
4.1.1	Solusi Michell dan Mekanika Statistik.....	68
4.1.2	Konstanta Elastisitas Cangkang Virus berdasar Teori Plat, dan Kulit ( <i>Plate and Shell Theory</i> ).....	80
4.2	Analisa Elemen Hingga/ <i>Finite Element Analysis</i> (FEA).....	83
4.2.1	<i>Cowpea Chlorotic Mottle Virus</i> (CCMV) <i>empty Wild Type</i> (WT). 84	
4.2.2	<i>Cowpea Chlorotic Mottle Virus</i> (CCMV) <i>empty SubE</i> (CCMV yang bermutasi).....	92
4.2.3	<i>Minute Virus of Mice</i> (MVM).....	96
4.2.4	<i>Hepatitis B Virus</i> (HBV) dengan T= 3.....	101
4.2.5	Kapsid HBV T = 4.....	106
4.2.6	Lipid Virus Influenza.....	111
4.2.7	<i>Human Immunodeficiency virus type 1- mature</i> (HIV-1 matang) ...	115

4.2.8	HIV-1 (belum matang ( <i>immature</i> )).....	119
4.3	Keterkaitan Konstanta Elastisitas Cangkang Virus dengan Bilangan Triangulasi.....	127
4.4	Keterkaitan antara Konstanta Elastisitas Cangkang Amplop dan Radiusnya .....	133
BAB 5	PENUTUP .....	136
5.1	Kesimpulan.....	136
5.2	Saran.....	138
DAFTAR PUSTAKA	.....	139
LAMPIRAN	.....	142



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rata-rata nilai kekakuan yang telah ditentukan pada virus, dan liposom influenza dengan menggunakan AFM (Schaap dkk, 2012). .....	20
Tabel 2.6 Transformasi Modulus Elastis antara tegangan bidang dan regangan bidang (Sadd, 2009). .....	43
Tabel 2.3 Fungsi tegangan, tegangan komponen radial dan tegangan geser (Barber, 1992) .....	49
Tabel 2.4 Fungsi tegangan, dan komponen perpindahannya (Barber 1992; Sadd 2009). .....	50
Tabel 3.1 Tahapan metode FEA untuk model cangkang virus. ....	61
Tabel 3.2 Karakteristik cangkang virus yang diteliti .....	66
Tabel 4.1 Perbandingan antara FEA dan teori <i>plate &amp; shell</i> . ....	88
Tabel 4.2 Perbandingan antara hasil FEA dan Analitis .....	89
Tabel 4.3 Perbandingan antara hasil FEA, dan teori <i>plate &amp; shell</i> . ....	95
Tabel 4.4 Perbandingan antara hasil FEA dan analitis. ....	96
Tabel 4.5 Perbandingan antara FEA dan teori <i>plate &amp; shell</i> . ....	100
Tabel 4.6 Perbandingan antara hasil FEA dan Analitis. ....	100
Tabel 4.7 Perbandingan antara FEA dan teori <i>plate &amp; shell</i> . ....	104
Tabel 4.8 Perbandingan antara FEA dan analitis. ....	105
Tabel 4.9 Perbandingan antara hasil FEA dan teori <i>plate &amp; shell</i> . ....	109
Tabel 4.10 Perbandingan antara hasil FEA dan hasil metode analitis. ....	110
Tabel 4.11 Perbandingan antara FEA dan teori <i>plate &amp; shell</i> . ....	114
Tabel 4.12 Perbandingan antara FEA dan metode analitis. ....	114
Tabel 4.13 Perbandingan antara FEA dan teori <i>plate &amp; shell</i> . ....	118
Tabel 4.14 Perbandingan antara FEA, dan Analitis. ....	118
Tabel 4.15 Perbandingan antara FEA, teori <i>plate &amp; shell</i> dan analitis. ....	122
Tabel 4.16 Tabel hasil FEA dan teori .....	126
Tabel 4.17 Nilai konstanta elastisitas kapsid berdasar bilangan triangulasi yang dimiliki kapsid. ....	132
Tabel 4.18 Nilai konstanta elastis cangkang berdasar radius eksternal yang dimiliki virus influenza, dan HIV-1 yang matang. ....	135

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skematis virus influenza (Schaap dkk, 2012).....	8
Gambar 2.2 Kapsid CCMV (Mateu, 2012).....	9
Gambar 2.3 AFM digunakan untuk mengukur kekakuan virus (Mateu, 2012)....	11
Gambar 2.4 (A) Keterkaitan antara kekakuan dan panjang silinder dengan $l_1 < l_2 < l_3$ , (B) Keterkaitan antara kekakuan dan diameter kulit bola dengan $d_1 < d_2 < d_3$ , (C) Penyetaraan pada silinder dan kulit bola (Gambar dibuat dengan menggunakan program Python).....	16
Gambar 2.5 (A) <i>Bald Virus</i> (B) <i>Liposome</i> (C) <i>Wild Type Virus</i> dan (D) Hubungan antara kekakuan virus influenza dan diameter yang dimiliki virus (Schaap dkk, 2012). ....	19
Gambar 2.6 Keterkaitan bilangan Triangulasi dengan besarnya virus pada HBV (Utrecht dkk, 2008). ....	22
Gambar 2.7 Visualisasi radius rata-rata pada kapsid virus (Gambar dibuat dengan menggunakan program ABAQUS).....	23
Gambar 2.8. <i>Plot</i> polinomial siklotomik ke-tiga dengan menggunakan program <i>Mathematica</i> .....	25
Gambar 2.9 Bilangan bulat Eisenstein sebagai titik potong kisi segitiga yang ada pada bidang kompleks (Parker dkk, 2016).....	27
Gambar 2.10 (A) Kapsid CCMV (Zandi dan Reguera, 2005) dan (B) kisi pada bilangan bulat Eisenstein untuk menentukan nilai bilangan triangulasi yang dimiliki kapsid CCMV (Gambar dibuat dengan menggunakan Microsoft Office Word). ....	29
Gambar 2.11 Contoh kasus <i>axisymmetric</i> pada teori elastisitas (Gambar dibuat dengan menggunakan program ABAQUS). ....	31
Gambar 2.12 Silinder panjang menggambarkan kondisi regangan bidang (Gambar dibuat dengan menggunakan program ABAQUS). ....	33
Gambar 2.13 Pelat elastis tipis menggambarkan kondisi tegangan bidang (Sadd, 2009). ....	38

Gambar 2.14 (A) Gaya yang bekerja pada pelat elastis tipis dan (B) Traksi pada pelat elastis tipis (Gambar dibuat dengan menggunakan program ABAQUS).....	39
Gambar 2.15 Elemen yang diambil dari suatu kulit ( <i>shell</i> ) (Timoshenko dan Gere, 1961). .....	52
Gambar 2.16 Tampilan kulit jika ditinjau dari samping .....	53
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian.....	60
Gambar 4.1 (a) Kapsomer tunggal <i>i</i> , dan <i>j</i> pada TYMV ( <i>Turnip Yellow Mosaic Virus</i> ), dan (b) Kapsid TYMV (Malkin, Kuznetsov, and Mcpherson 2001).....	69
Gambar 4.2 Kulit bola yang terbebani dalam pengaruh tekanan eksternal <i>p</i> (Hutchinson and Thompson 2018).....	74
Gambar 4.3 Model FEA cangkang dengan titik putih menunjukkan disk cangkang dan dengan tensor tegangan seragam sehingga dari sini dapat dikaitkan dengan tensor tegangan solusi persamaan Michell (Gambar dibuat dengan menggunakan program ABAQUS). .....	75
Gambar 4.4 Fenomena tekuk ( <i>Buckling</i> ) pada kulit permukaan bola tipis (Khakina 2013). .....	78
Gambar 4.5 Jangkauan <i>thin shell</i> , <i>thick shell</i> , dan <i>solid</i> (Akin 2009).....	80
Gambar 4.6 Analisa metode FEA pada virus CCMV <i>empty</i> WT yang terindentasi dengan kedalaman sebesar 15 nm. ....	84
Gambar 4.7 Kemiringan gradien yang didapatkan pada hasil <i>FEA</i> untuk cangkang kapsid CCMV <i>empty</i> WT.....	85
Gambar 4.8 (A) perbandingan grafik konstanta elastisitas antara teori <i>plate &amp; shell</i> dengan FEA, (B) perbandingan grafik konstanta elastisitas antara metode analitis dengan FEA dan (C) perbandingan grafik konstanta elastisitas antara teori <i>plate &amp; shell</i> , metode analitis dan FEA. ....	87
Gambar 4.9 (a) Model indentasi balok, (b) zoom model dan (c) perbandingan hasil antara teori Hertz dengan FEA ABAQUS. ....	91
Gambar 4.10 Analisa metode FEA pada virus CCMV <i>empty</i> SubE yang terindentasi dengan kedalaman indentasi sebesar 10 nm. ....	92
Gambar 4.11 Kemiringan gradien hasil FEA untuk kapsid CCMV <i>empty</i> SubE. ....	93

Gambar 4.12 perbandingan hasil konstanta elastisitas pad kapsid CCMV <i>empty</i> WT antara teori <i>plate &amp; shell</i> , metode FEA, dan analitis. ....	94
Gambar 4.13 Analisa metode FEA pada kapsid MVM yang terindentasi dengan kedalaman sebesar 10 nm. ....	97
Gambar 4.14 Kemiringan gradien yang didapatkan pada hasil <i>FEA</i> untuk cangkang kapsid MVM. ....	98
Gambar 4.15 Perbandingan grafik konstanta elastisitas antara teori <i>plate &amp; shell</i> , metode analitis dan FEA pada kapsid MVM. ....	99
Gambar 4.16 Model terindentasi sampai kedalaman 10 nm. ....	101
Gambar 4.17 Hasil kemiringan gradien dengan menggunakan metode FEA. ....	102
Gambar 4.18 Grafik konstanta elastisitas kapsid HBV dengan $T = 3$ . ....	103
Gambar 4.19 Model terindentasi sampai kedalaman 10 nm. ....	106
Gambar 4.20 Hasil kemiringan gradien dengan menggunakan metode FEA. ....	107
Gambar 4.21 Perbandingan grafik konstanta elastisitas pada kapsid HBV dengan $T = 4$ . ....	108
Gambar 4.22 Model terindentasi dengan kedalaman 10 nm. ....	111
Gambar 4.23 Hasil kemiringan gradien dengan menggunakan metode FEA. ....	112
Gambar 4.24 Perbandingan grafik konstanta elastisitas lipid virus Influenza secara teori dan numerik. ....	113
Gambar 4.25 Model terindentasi sampai kedalaman 10 nm. ....	115
Gambar 4.26 Hasil Gradien konstanta elastisitas virion HIV-1 (matang) ....	116
Gambar 4.27 Perbandingan grafik konstanta elastisitas pada cangkang HIV tipe 1(matang) berdasarkan teori <i>plate &amp; shell</i> , FEA dan analitis. ....	117
Gambar 4.28 Model cangkang HIV-1 yang belum matang terindentasi sampai kedalaman 10 nm. ....	119
Gambar 4.29 Hasil kemiringan gradien FEA. ....	120
Gambar 4.30 Perbandingan konstanta elastisitas berdasar teori <i>plate &amp; shell</i> , analitis dan FEA. ....	121
Gambar 4.31 Hasil kemiringan gradien berdasar teori Hertz. ....	124
Gambar 4.32 Perbandingan konstanta elastisitas berdasarkan teori <i>plate &amp; shell</i> , analitis, FEA dan teori Hertz. ....	125



Gambar 4.33 Keterkaitan antara konstanta elastisitas dengan bilangan triangulasi.  
..... 129

Gambar 4.34 Keterkaitan antara konstanta elastis cangkang kapsid dan bilangan triangulasi..... 131

Gambar 4.35 (a) Grafik keterkaitan antara konstanta elastis lipid dan radius eksternal lipid untuk virus influenza, dan (b) Grafik keterkaitan antara konstanta elastis cangkang virion dan radius eksternal virion untuk virus HIV-1 (matang).  
..... 134



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Bilangan Bulat Eisenstein.....	142
Lampiran B. Bilangan Triangulasi Virus.....	145
Lampiran C. <i>Plane Strain</i> .....	146
Lampiran D. <i>Plane Stress</i> .....	149
Lampiran E. Fungsi Tegangan Airy ( <i>Airy Stress Function</i> ) .....	153
Lampiran F. Tekanan dalam kasus kulit bola. ....	160
Lampiran G. Kalkulasi Tekanan Tensor. ....	162
Lampiran H. Teorema Virial.....	164
Lampiran I. Tekanan dalam variasi kontainer pada sisitem setimbang .....	177
Lampiran J. Tensor tegangan 2D dan 3D.....	184
Lampiran K. Kalkulasi konstanta elastisitas cangkang virus dengan tensor tegangan solusi Michell.....	187
Lampiran L. Persamaan tensor tegangan untuk kasus tegangan bidang.....	191
Lampiran M. Penjabaran tensor tegangan berdasar fungsi tegangan Airy ( $\phi$ )...	195
Lampiran N. Kondisi Batas ( <i>Boundary Condition</i> ) .....	197
Lampiran O. Mengapa tanpa pernyataan natural log ? .....	199
Lampiran P. <i>Buckling</i> pada kulit bola tipis .....	201

## TATA NAMA NOTASI DALAM SKRIPSI

Berikut ini merupakan tata nama notasi dalam skripsi, yaitu sebagai berikut :

$u$ , dan  $v$  = perpindahan (*displacement*) pada bidang  $x$ , dan  $y$ .

$w$  = perpindahan pada arah  $z$

$e_{ij}$  = Tensor regangan normal

$\sigma_{ii}$  = *normal stress tensor*/ tensor tegangan normal

$\tau_{ij}$  = *shear stress tensor*/ tensor tegangan geser

$E$  = Modulus Young atau Modulus elastisitas

$\mu$  = *Modulus of rigidity*/ modulus ketegaran

$\lambda$  = Konstanta Lamé

$\Lambda$  = Panjang gelombang De Broglie

$\nu$  = rasio Poisson

$h$  = ketebalan

$\chi_x$  = perubahan kelengkungan pada arah  $x$

$\chi_y$  = perubahan kelengkungan pada arah  $y$

$F_x, F_y$  = komponen gaya benda/*body*  $x$ , dan  $y$

$\sigma_T$  = Tensor tegangan lateral.

$\delta R$  = deformasi radial

$d$  = skala wilayah bengkakan pada kulit.

$D$  = *flexural rigidity*/ketegaran lentur

$\sigma$  = beban/*load*

$M$  = momen

$N_x, N_y, N_{xy}$  = gaya normal, dan gaya geser per satuan jarak dalam permukaan tengah kulit

$Q_x, Q_y$  = gaya geser per satuan jarak pada kulit

$Q$  = Fungsi partisi

$U_b$  = energi pembengkokan/*bending energy*

$U_s$  = energi peregangan/*stretching energy*

$p$  = tekanan radial eksternal

$k$  = konstanta elastisitas

$k_B$  = konstanta Boltzman

$T$  = temperatur, bilangan triangulasi

$r$  = jarak radial

$R_1$  = radius internal cangkang atau kulit virus

$R$  = radius tengah cangkang atau kulit virus, radius indenter

$R_2$  = radius eksternal cangkang atau kulit virus

$H$  = Energi bebas Helmholtz

$V$  = volume cangkang atau kulit virus

$V(r_{ij})$  = energi potensial antar material kapsid maupun lipid

$u(r_i)$  = energi potensial total pada cangkang virus

$\beta$  = konstanta dengan  $\frac{1}{kT}$

$r_{ij}$  = jarak antar material kapsomer maupun lipid  $i$  dan  $j$

$\Omega^d$  = menyatakan luas permukaan bola dengan  $d=2$ , dan menyatakan volume bola dengan  $d=3$

$t_i$  = koordinat kapsomer maupun lipid

$\delta R$  = kedalaman indentasi

