



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR –TL184834

**SIMULASI DELAMINASI LAMINAT KOMPOSIT SERAT
KARBON TERHADAP VARIASI ARAH SERAT
MENGUNAKAN TEKNIK COHESIVE ZONE MODEL (CZM)
DAN VIRTUAL CRACK CLOSURE (VCC) DENGAN METODE
ELEMEN HINGGA**

**IQBAL BAGASKORO
NRP. 0251164000011**

**Dosen Pembimbing
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR–TL184834

SIMULASI DELAMINASI LAMINAT KOMPOSIT SERAT KARBON TERHADAP VARIASI ARAH SERAT MENGGUNAKAN TEKNIK COHESIVE ZONE MODEL (CZM) DAN VIRTUAL CRACK CLOSURE (VCC) DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

IQBAL BAGASKORO
NRP. 0251164000011

Dosen Pembimbing
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT–TL184834

**DELAMINATION SIMULATION OF CARBON FIBER
COMPOSITE LAMINATE TOWARD VARIATION ON
FIBER DIRECTION USING COHESIVE ZONE MODEL
(CZM) AND VIRTUAL CRACK CLOSURE (VCC)
TECHNIQUE WITH FINITE ELEMENT METHOD**

IQBAL BAGASKORO
NRP. 0251164000011

Supervisors

Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**SIMULASI DELAMINASI LAMINAT KOMPOSIT SERAT
KARBON TERHADAP VARIASI ARAH SERAT
MENGUNAKAN TEKNIK COHESIVE ZONE MODEL
(CZM) DAN VIRTUAL CRACK CLOSURE (VCC)
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

IQBAL BAGASKORO
NRP 0251164000011

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mas Irfan P. Hidayat , S.T., M.Sc., Ph.D (Pembimbing I)
2. Dr. Eng. Hosta Ardhyana, S.T., M.Sc. (Pembimbing II)



SURABAYA
Agustus 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**SIMULASI DELAMINASI LAMINAT KOMPOSIT SERAT
KARBON TERHADAP VARIASI ARAH SERAT
MENGUNAKAN TEKNIK COHESIVE ZONE MODEL
(CZM) DAN VIRTUAL CRACK CLOSURE (VCC)
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

Nama : Iqbal Bagaskoro
NRP : 0251154000011
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
PembimbingI : Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D.
PembimbingII : Dr. Eng. Hosta A., S.T., M.Sc.

Abstrak

Perkembangan teknologi material komposit terutama di material komposit laminat sangat pesat. Material komposit yang banyak digunakan saat ini ialah material komposit laminat. Material komposit laminat tersusun dari beberapa gabungan lamina-lamina yang berikatan sehingga sering menyebabkan terjadinya deformasi. Salah satu dari model kerusakan kritis pada komposit laminat yaitu delaminasi. Untuk mengetahui proses delaminasi, dimodelkan double cantilever beam dengan pembebanan beban berupa displacement. Dalam penelitian ini dilakukan analisa delaminasi laminat terhadap variasi arah serat yaitu $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/+90/-45]_2s$ dengan menggunakan teknik Cohesive Zone Model (CZM) dan Virtual Crack Closure (VCC) menggunakan ANSYS Workbench 19.1 dengan modal static structural. Kemudian dilakukan analisa dari hasil simulasi numerik delaminasi pada material sesuai dengan teori. Dengan menggunakan 3750 elemen, 7500 elemen dan 15000 elemen didapatkan hasil bahwa nilai critical force dari variasi $[0/+45/+90/-45]_2s$ jauh lebih besar daripada $[0/+45/+45/0]_2s$ dan juga dianalisis karakterisasi dari stress-strain hasil dari simulasi.

Kata kunci: *Delaminasi, Variasi Arah Serat, CZM, VCC.*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**DELAMINATION SIMULATION OF CARBON FIBER
COMPOSITE LAMINATE TOWARD VARIATION ON
FIBER DIRECTION USING COHESIVE ZONE MODEL
(CZM) AND VIRTUAL CRACK CLOSURE (VCC)
TECHNIQUE WITH FINITE ELEMENT METHOD**

Student Name : Iqbal Bagaskoro
NRP : 0251164000011
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D.
Co-Supervisor : Dr. Eng. Hosta A, S.T., M.Sc.

Abstract

The development of composite material technology, especially in composite laminate materials, is very rapid. Laminate composite materials is composed of several combinations of binding laminas that often cause deformation. One of the critical damage models in laminate composites is delamination. To find out the process of delamination, a double cantilever beam model is modeled by loading the displacement load. In this study, laminate delamination analysis were carried out on the variation of fiber direction, namely [0 /+45 /+45/0]2s and [0 /+45 /+90/-45]2s using Cohesive Zone Model (CZM) and Virtual techniques Crack Closure (VCC) uses ANSYS Workbench 19.1 with static structural modules. Then an analysis of the numerical simulation results of delamination of the material in accordance with the theory. By using 3750 elements, 7500 elements and 15000 elements, it was found that the critical force values of the variations of [0/+45/+ 90/-45]2s were much greater than [0/+45/+45/0]2s and were also analyzed characterization of stress-strain results from simulations.

Keywords: *Delamination, Fiber Direction Variation, CZM, VCC.*

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa berkat rahmat dan karunia-Nya penelitian Tugas Akhir dengan judul “**Simulasi Delaminasi Laminat Komposit Serat Karbon Terhadap Variasi Arah Serat Menggunakan Teknik *Cohesive Zone Model (CZM)* dan *Virtual Crack Closure (VCC)* dengan Metode Elemen Hingga**” dapat terlaksanakan dengan baik dan dapat selesai tepat pada waktunya. Tujuan dari penyusunan Laporan Tugas Akhir adalah untuk memenuhi salah satu syarat akademis yang wajib dipenuhi dalam kuliah program studi Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Terselesaikannya Laporan Tugas Akhir tidak luput dari bantuan, motivasi serta partisipasi dari semua pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kasih kepada:

1. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D dan Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
2. Orang tua yang selalu mendukung serta memberikan doa selama penelitian tugas akhir dan penyusunan laporan.

Penulis menyadari penyusunan laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan ini dapat berguna bagi penulis dan semua pihak yang terkait.

Surabaya, 10 Juli 2020
Penulis

Iqbal Bagaskoro

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
Abstrak	vii
Abstract.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Material Komposit.....	5
2.1.1 Material Isotropik, Anisotropik dan Orthotropik	8
2.1.2 Sifat Fundamental Komposit	10
2.1.3 Teori Laminasi	11
2.1.4 Komposit Laminat	12
2.2 Matriks	14
2.2.1 <i>Metal Matrix Composite</i> (MMC).....	15
2.2.2 <i>Ceramic Matrix Composite</i> (CMC)	15
2.2.3 <i>Polymer Matrix Composite</i> (PMC).....	16
2.3 Resin Epoksi.....	16
2.4 Serat Karbon.....	17
2.5 Pengaruh Variasi Arah Serat	18
2.6 Delaminasi.....	21
2.7 Metode Elemen Hingga	23
2.8 Analisis Numerik Delaminasi	25
2.8.1 Cohesive Zone Model (CZM).....	26
2.8.2 Virtual Crack Closure (VCC)	27
2.9 Analisis Jumlah Elemen <i>Mesh</i>	31

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1	Diagram Alir Penelitian37
3.2	Spesifikasi Material Komposit.....39
3.3	Peralatan dan Perangkat Lunak Penelitian40
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1	Analisis Data51
4.1.1	Analisis <i>Mesh Sensitivity</i>51
4.1.2	Analisis Kurva <i>Critical Force-Displacement</i>52
4.2	Analisis Karakterisasi Delaminasi Melalui Kurva <i>Stress-Strain</i> dan <i>Stress-Strain Distribution</i>58
4.2.1	Pengaruh Metode terhadap <i>Stress-Strain Distribution</i>59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1	Kesimpulan.....63
5.2	Saran.....63
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN	67
UCAPAN TERIMA KASIH	77
BIODATA PENULIS	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perbandingan sifat mekanik antara baja, aluminum, dan komposit.....	6
Gambar 2.2	Aplikasi komposit pada pesawat militer.....	7
Gambar 2.3	Elemen isotropik material dibawah kondisi tegangan	8
Gambar 2.4	Elemen orthotropik material komposit pada kondisi tegangan.....	9
Gambar 2.5	Lamina dan laminat.....	12
Gambar 2.6	<i>Multidirectional</i> laminat dan referensi sistem koordinat	13
Gambar 2.7	Macam-macam matriks pada komposit.....	14
Gambar 2.8	Struktur kimia resin epoksi	17
Gambar 2.9	Struktur kristal dari serat karbon	18
Gambar 2.10	Kekuatan kegagalan pada beberapa <i>stacking sequence</i>	19
Gambar 2.11	Kekuatan kegagalan di berbagai posisi lapisan 0°	20
Gambar 2.12	Mode dasar delaminasi.....	22
Gambar 2.13	Uji <i>double cantilever beam</i> (DCB).....	22
Gambar 2.14	Sebuah pelat dengan lubang yang diberi pembebanan (a) ditarik pada kedua sisi (b) digunakan <i>mesh</i> sebagai pemecahan seperempat bidang pelat (c) diterapkan kontur tegangan longitudinal.....	24
Gambar 2.15	Zona kohesif	27
Gambar 2.16	Formulasi masalah : (a) komponen patahan (b) FEM <i>mesh</i>	29
Gambar 2.17	Standar teknik VCC : (a) kekuatan pada ujung retakan (b) <i>displacement</i> pada ujung retakan	30
Gambar 2.18	Model numerik dengan <i>mesh</i> pada ujung retakan	31

Gambar 2.19	Perbandingan kekuatan dan <i>displacement</i> hasil eksperimental dan simulasi.....	33
Gambar 2.20	Sebuah laminat [0/90] _s mengalami pertumbuhan delaminasi diantara <i>ply</i> 0° dan 90°	34
Gambar 2.21	Distribusi tegangan ekuivalen pada laminat quasi-isotropik saat <i>displacement</i> awal.....	35
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	38
Gambar 3.2	Input sifat mekanik pada <i>Engineering Data Library</i>	42
Gambar 3.3	Geometri spesimen <i>double cantilever</i>	43
Gambar 3.4	Pembuatan geometri pada perangkat lunak ANSYS <i>Design Modeller</i>	43
Gambar 3.5	Geometri setelah dilakukan <i>meshing</i>	44
Gambar 3.6	Pengaturan material <i>fabric</i> dan orientasi elemen	45
Gambar 3.7	Pengaturan <i>Interface Layer Properties</i>	46
Gambar 3.8	Pengaturan <i>Modelling Ply Properties</i> dan orientasi arah serat	47
Gambar 3.9	Pengaturan pada <i>Analysis Setting</i>	48
Gambar 3.10	Pengaturan <i>Boundary Condition</i>	49
Gambar 3.11	Contoh <i>Solution</i>	49
Gambar 3.12	Contoh <i>Tabular Data</i>	50
Gambar 4.1	Perbandingan <i>mesh</i> dari variasi [0/+45/+45/0] _{2s} (kiri) dan [0/+45/90/-45] _{2s} (kanan) pada nilai F_{crit} terhadap <i>displacement</i> dengan jumlah elemen 3750 menggunakan metode (a) CZM (b) VCC ...	54

Gambar 4.2	Perbandingan <i>mesh</i> dari variasi [0/+45/+45/0]2s (kiri) dan [0/+45/90/-45]2s (kanan) pada nilai F_{crit} terhadap <i>displacement</i> dengan jumlah elemen 7500 menggunakan metode (a) CZM (b) VCC.....	55
Gambar 4.3	Perbandingan <i>mesh</i> dari variasi [0/+45/+45/0]2s (kiri) dan [0/+45/90/-45]2s (kanan) pada nilai F_{crit} terhadap <i>displacement</i> dengan jumlah elemen 15000 menggunakan metode (a) CZM (b) VCC.....	56
Gambar 4.4	Grafik <i>Stress-Strain</i> pada variasi [0/+45/+45/0] (atas) dan [0/+45/+90/-45] (bawah)	58
Gambar 4.5	Hasil <i>Equivalent Stress</i> pada metode (a) CZM dan (b) VCC	59
Gambar 4.6	Hasil <i>Equivalent Elastic Strain</i> dari metode (a) CZM dan (b) VCC	59
Gambar 4.7	Hasil <i>Equivalent Stress</i> pada metode (a) CZM dan (b) VCC	60
Gambar 4.8	Hasil <i>Equivalent Elastic Strain</i> dari metode (a) CZM dan (b) VCC	60

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Contoh jumlah <i>node</i> dan elemen permodelan <i>double cantilever beam</i> (DCB).....	32
Tabel 2.2	Perbandingan faktor simulasi	36
Tabel 3.1	Spesifikasi material penelitian	39
Tabel 3.2	Desain penelitian.....	41
Tabel 4.1	<i>Mesh sensitivity analysis</i>	53

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Komposit berpenguat serat memiliki kelebihan dalam hal kekuatan. Kekuatan tersebut juga dapat terjadi dengan adanya pengaturan orientasi arah serat. Untuk mendapatkan sifat yang diinginkan, maka komposit dapat diatur sedemikian rupa sesuai dengan kebutuhan (Chawla, 2013). Material komposit yang sering digunakan yaitu komposit laminat. Suatu laminat adalah gabungan dua atau lebih lamina yang bertindak sebagai elemen struktural. Variasi lamina dengan pengaturan orientasi arah serat ditujukan untuk memperoleh elemen struktural yang mampu menahan pembebanan dari berbagai arah (Jones, 2000).

Salah satu mode kegagalan yang paling sering diamati dalam laminasi komposit yaitu delaminasi. Adanya delaminasi secara signifikan dapat mengurangi kekakuan dan kekuatan struktur komposit. Simulasi delaminasi dilakukan oleh dua jenis metode, antara lain *virtual crack closure* (VCC) dan *cohesive zone method* (CZM). Teknik VCC adalah pendekatan mekanika fraktur yang banyak digunakan untuk menghitung tingkat pelepasan energi. Sementara itu, CZM adalah peristiwa progresif pengurangan *interface* yang menggunakan perilaku bilinear material untuk *interface* delaminasi dan energi kegagalan untuk menganalisis delaminasi pada spesimen *double cantilever beam* (DCB) (Waseem, 2014).

Maka dari itu, untuk mendapatkan perambatan retak delaminasi pada material komposit, diperlukan metode numerik dengan variabel dan parameter yang efektif untuk mendapatkan hasil yang akurat. Pada penelitian ini, akan dilakukan analisa numerik terhadap perambatan retak delaminasi pada material komposit serat karbon menggunakan metode CZM dan VCC dengan variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/90/-45]_2s$ dengan membandingkan karakteristik dan nilai acuan serta melakukan validasi terhadap eksperimen yang telah dilakukan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, didapat beberapa poin rumusan masalah dalam penelitian ini, diantaranya adalah:

1. Bagaimanakah hasil simulasi numerik delaminasi material komposit serat karbon dengan variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/90/-45]_2s$ menggunakan metode CZM dan VCC dibandingkan dengan pendekatan teoritis?
2. Bagaimanakah karakteristik delaminasi untuk material komposit serat karbon dengan variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/90/-45]_2s$?

1.3 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan, maka diperlukan batasan masalah pada penelitian ini, antara lain sebagai berikut:

1. Kondisi fisik material komposit dianggap sempurna.
2. Pengaruh fisik eksternal diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan beberapa poin rumusan masalah pada subbab sebelumnya, dapat ditentukan tujuan dari penelitian ini, diantaranya adalah:

1. Menganalisa hasil simulasi numerik delaminasi material komposit serat karbon dengan variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/90/-45]_2s$ menggunakan metode CZM dan VCC dibandingkan dengan pendekatan teoritis.
2. Menganalisa karakteristik delaminasi untuk material komposit serat karbon dengan variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/90/-45]_2s$.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah dapat dijadikan sebagai referensi penelitian-penelitian material komposit selanjutnya khususnya pada komposit laminat. Selain

itu juga dapat membantu industri untuk menciptakan material komposit yang lebih unggul dan dapat diaplikasikan di berbagai bidang.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

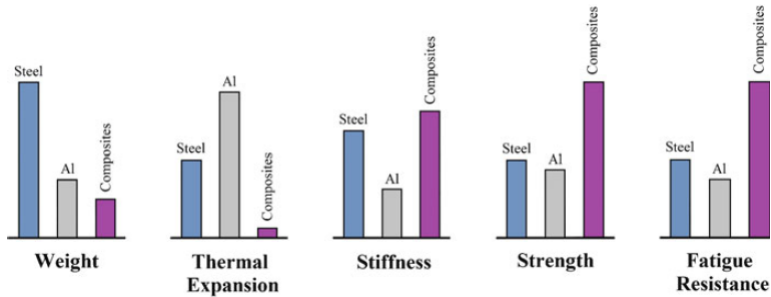
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Komposit

Material komposit adalah suatu material yang terdiri dari dua komponen atau lebih yang memiliki sifat atau struktur berbeda-beda yang dicampur secara fisik menjadi satu membentuk ikatan mekanik yang dengan struktur homogen secara makroskopik dan heterogen secara mikroskopik. Material campuran tersebut kemudian akan menghasilkan material yang baru yang memiliki sifat unggul dari material pembentuk. Dengan menggabungkan dua atau lebih material yang berbeda, maka dapat diperbaiki dan dikembangkan sifat mekanik dan fisik dari material tersebut seperti kekuatan, kekakuan, ketahanan korosi ketahanan gesek, konduktivitas termal, insulasi listrik, insulasi panas, ketahanan fatik, dan lain-lain (Sulistijono, 2012).

Namun, penggunaan secara umum, bahan komposit dibatasi untuk menekankan material yang mengandung konstituen matriks kontinu yang terikat bersama dan membentuk kesatuan konstituen yang lebih kuat dan rigid. Material komposit yang dihasilkan memiliki keseimbangan sifat struktural dan performa yang lebih baik daripada material penyusunnya. Sifat struktural yang ditingkatkan umumnya dihasilkan dari mekanisme pembagian beban.

Komposit umumnya dibedakan dengan dua klasifikasi berbeda. Klasifikasi pertama biasanya dibuat sehubungan dengan konstituen matriks. Material komposit yang terdapat dalam klasifikasi ini adalah komposit matriks polimer (*polymer matrix composites*, PMC), komposit matriks logam (*metal matrix composites*, MMC), dan komposit matriks keramik (*ceramic matrix composites*, CMC). Gambar 2.1 menunjukkan perbandingan antara baja, aluminum dan komposit pada beberapa sifat mekanik dari masing-masing material (Chawla, 2013).

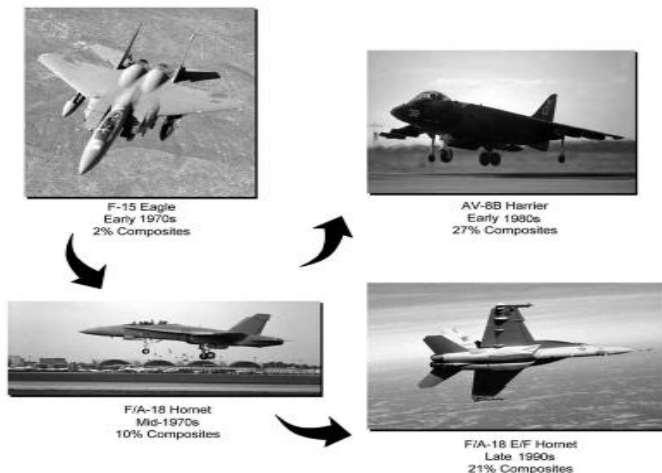


Gambar 2.1 Perbandingan sifat mekanik antara baja, aluminum, dan komposit (Chawla, 2013)

Klasifikasi tingkat kedua mengacu pada bentuk antara lain *particulate reinforcements*, *whisker reinforcements*, *continuous fiber laminated composites*, dan *woven composites*. Untuk memberikan peningkatan sifat, umumnya harus ada fraksi volume substansial (10% atau lebih). Penguatan dianggap sebagai partikel jika semua dimensinya diperkirakan sama. Dengan demikian, komposit yang diperkuat partikulat (*particulate reinforced composites*) termasuk yang diperkuat oleh bentuk-bentuk partikulat lain seperti bola, batang, serpih, dan masih banyak bentuk lain dari sumbu yang kira-kira sama. Penguat whisker (*whisker reinforcements*), dengan rasio aspek biasanya berkisar dalam rentang sekitar 20 hingga 100, sehingga sering dipertimbangkan bersama dengan partikulat dalam MMC. Bersama-sama, ini diklasifikasikan sebagai penguat "discontinuous", karena fase penguat terputus-putus untuk fraksi volume rendah yang biasanya digunakan dalam MMC. Ada juga bahan, biasanya polimer, yang mengandung partikel yang memanjang daripada memperkuat bahan. Karena partikel pengisi dimasukkan untuk tujuan pengurangan biaya daripada penguatan, komposit ini umumnya tidak dianggap sebagai komposit partikulat. Meskipun demikian, dalam beberapa kasus pengisi juga akan memperkuat bahan matriks. Hal yang sama mungkin

berlaku untuk partikel yang ditambahkan untuk keperluan nonstruktural, seperti tahan api dan peningkatan konduktivitas termal atau listrik (Chawla, 2013).

Material komposit dapat diaplikasikan di berbagai bidang seperti bidang penerbangan, konstruksi dan berbagai infrastruktur lainnya. Secara umum, material komposit mempunyai performa yang tinggi. Sebagai contoh pada pesawat militer seperti pada Gambar 2.2, keringanan dan performa yang tinggi sangatlah diutamakan. Dengan material komposit, pesawat tersebut dapat mengurangi beban sekitar 20 sampai 40%. Material komposit yang sering digunakan yaitu komposit serat karbon dan komposit serat kaca. Baik skala kecil maupun besar penerbangan komersial masih tergantung pada komposit. Hal ini dikarenakan pengurangan beban dan menambah performa terutama pada bahan bakar, sebagai contoh juga pada pesawat Boeing dan Airbus, dimana pengurangan beban mencapai 15 sampai 40% (Campbell, 2010).

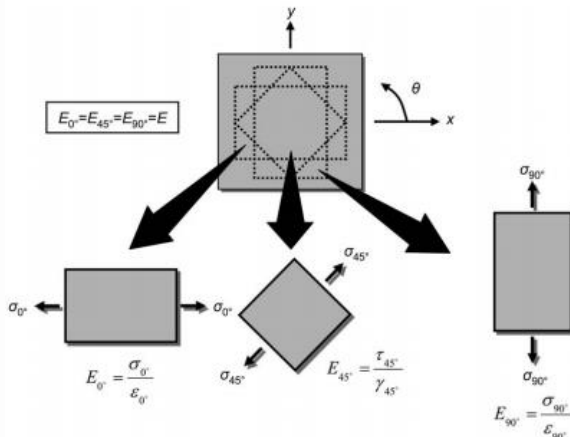


Gambar 2.2 Aplikasi komposit pada pesawat militer
(Campbell, 2010)

Korosi yang menjadi masalah utama dapat diminimalisir dengan penggunaan material komposit. Material komposit juga menawarkan kemampuan untuk tahan lama dan tingkat perawatan yang rendah. Sehingga material komposit telah digunakan secara ekstensif di berbagai bidang (Campbell, 2010).

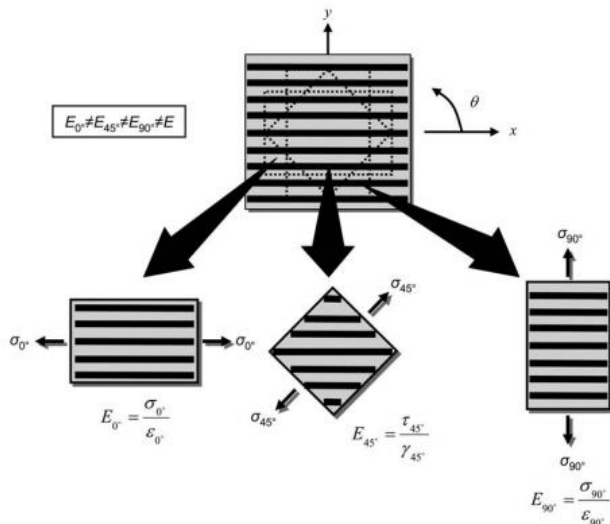
2.1.1 Material Isotropik, Anisotropik dan Orthotropik

Material dapat diklasifikasikan sebagai isotropik atau anisotropik. Material isotropik memiliki sifat material yang sama pada segala arah, dengan kondisi pembebanan normal hanya menghasilkan regangan normal. Sementara itu, material anisotropik memiliki sifat material yang berbeda di segala arah dan tidak terdapat bidang material yang simetri, serta pembebanan normal menghasilkan kedua regangan menjadi regangan normal dan regangan geser. Material dikatakan isotropik apabila terdapat independensi pada arah dalam material. Sebagai contoh, elemen dari material isotropik yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Apabila material dimuat sepanjang arah 0° , 45° , dan 90° akan memiliki modulus elastisitas (E) yang sama di setiap arah ($E_{0^\circ} = E_{45^\circ} = E_{90^\circ}$) (Campbell, 2010).



Gambar 2.3 Elemen isotropik material dibawah kondisi tegangan (Campbell, 2010)

Namun, pada material anisotropik seperti komposit yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 memiliki sifat yang berbeda pada segala arah. Dalam hal ini, didapatkan modulus elastisitas yang berbeda di setiap arah ($E_{0^\circ} \neq E_{45^\circ} \neq E_{90^\circ}$). Sementara itu modulus elastisitas yang digunakan pada contoh bergantung kepada arah dan dapat berpengaruh untuk sifat dari material, seperti kekuatan akhir dan koefisien ekspansi termal. Sementara itu, material komposit adalah subklas dari material anisotropik yang diklasifikasikan sebagai material orthotropik. Material orthotropik memiliki sifat yang berbeda dalam tiga arah yang saling tegak lurus. Material orthotropik memiliki tiga sumbu simetri yang saling bersamaan, dan beban yang diterapkan sejajar dengan sumbu tersebut dan hanya menghasilkan regangan normal. Namun, beban yang tidak diterapkan sejajar pada sumbu ini dapat menghasilkan baik regangan normal dan geser. Oleh karena itu, sifat mekanik orthotropik adalah fungsi dari orientasi (Campbell, 2010).



Gambar 2.4 Elemen orthotropik material komposit pada kondisi tegangan (Campbell, 2010)

2.1.2 Sifat Fundamental Komposit

Ketika komposit berserat kontinu yang searah dengan lamina atau laminasi diberi beban yang arahnya paralel dengan serat, modulus longitudinal E_{11} dapat diperkirakan dari sifat konstituen dengan menggunakan apa yang dikenal sebagai aturan campuran (*rule of mixtures*):

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.1)$$

di mana E_f adalah modulus serat, V_f adalah persentase volume serat, E_m adalah modulus matriks, dan V_m adalah persentase volume matriks. Sementara kekuatan tarik longitudinal E_{11} juga dapat diperkirakan oleh aturan campuran (*rule of mixtures*):

$$\sigma_{11} = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2.2)$$

di mana σ_f dan σ_m adalah kekuatan serat dan kekuatan matriks. Karena sifat dari serat mendominasi untuk semua praktis volume persentase, nilai matriks dapat sering diabaikan, karenanya:

$$E_{11} \approx E_f V_f \quad (2.3)$$

$$\sigma_{11} = \sigma_f V_f \quad (2.4)$$

aturan campuran (*rule of mixtures*) untuk sifat lamina termasuk *Poisson's ratio* ν_{12} dan untuk modulus geser G_{12} :

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (2.5)$$

$$1/G_{12} = V_f/G_f + V_m/G_m \quad (2.6)$$

Sifat fisik lain, seperti densitas (ρ), dapat juga dinyatakan menggunakan aturan campuran (*rule of mixtures*) menggunakan hubungan:

$$\rho_{12} = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2.7)$$

Sementara untuk persamaan mikromekanik digunakan sebagai estimasi pertama dari sifat lamina. Bila tidak ada data yang tersedia, umumnya tidak menghasilkan nilai yang cukup akurat untuk tujuan desain. Untuk tujuan desain, lamina dasar dan sifat laminasi harus ditentukan dengan menggunakan uji sifat mekanik yang sebenarnya (Campbell, 2010).

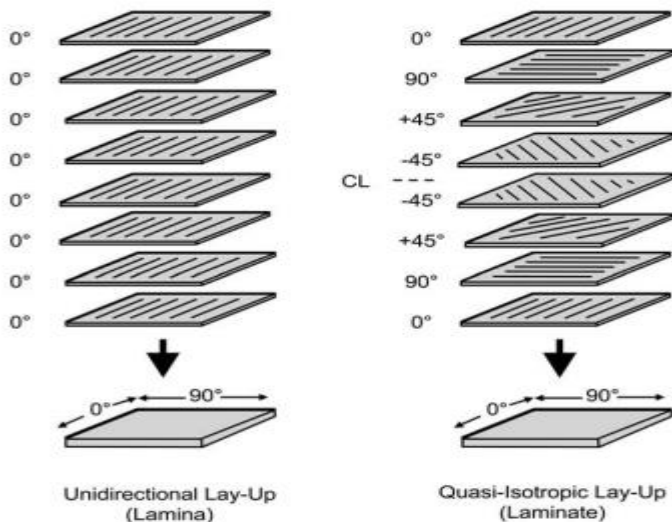
2.1.3 Teori Laminasi

Equivalent single layer theory (ESL) yang berasal dari teori elastisitas 3-D dengan membuat asumsi yang sesuai mengenai kinematika dari deformasi atau keadaan tegangan melalui ketebalan dari laminasi. *Equivalent single layer theory* (ESL) adalah teori dimana terdapat pelat laminasi heterogen diperlakukan sebagai statis, satu lapisan yang memiliki tingkah laku anisotropik, mereduksi permasalahan-permasalahan pada 3-D menjadi 2-D. Teori ini dikembangkan dengan asumsi bentuk bidang *displacement* ataupun bidang tegangan sebagai linear kombinasi dari fungsi dan koordinat ketebalan. *Equivalent single layer theory* (ESL) yang paling sederhana adalah *classical laminate plate theory* (CLPT), yang merupakan perpanjangan dari teori lempeng Kirchhoff (klasik) untuk pelat komposit laminasi. Hipotesis Kirchhoff menyiratkan bahwa garis normal menuju bidang pelat setelah deformasi tetap lurus dan normal dan akibatnya, baik regangan transversal dan efek normal transversal diabaikan.

Teori berikutnya dalam hierarki teori laminasi *equivalent single layer theory* (ESL) yaitu *first order shear deformation theory* (FSDT), yang memperluas kinematika CLPT dengan menyertakan deformasi geser transversal dalam kinematik asumsi, yaitu tegangan geser transversal diasumsikan konstan terhadap koordinat ketebalan. *First order shear deformation theory* (FSDT) memerlukan faktor koreksi geser untuk menentukan struktur lapisan komposit. Faktor koreksi geser tidak hanya tergantung pada parameter laminasi dan geometris, tetapi juga pada pemuatan dan kondisi batas (Reddy, 2000).

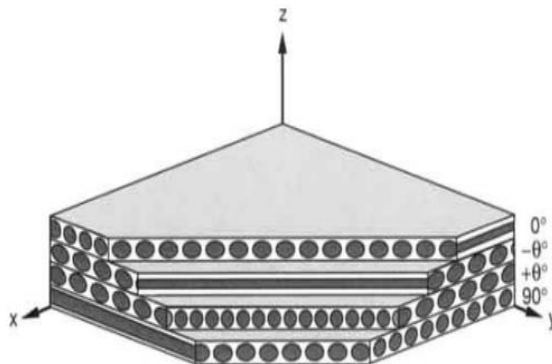
2.1.4 Komposit Laminat

Ketika ada satu lapisan atau *lay-up* di mana semua lapisan ditumpuk dalam suatu orientasi, *lay-up* tersebut dinamakan lamina. Ketika bertumpuk pada berbagai orientasi arah, lapisan tersebut dinamakan laminasi. Tegangan longitudinal dan beban kompresi ditanggung oleh serat, sementara matriks mendistribusikan beban antar serat dan menstabilkan serat serta mencegah terjadinya tekuk pada saat kompresi. Karena orientasi arah serat berdampak langsung terhadap sifat mekanik, tampaknya logis untuk orientasi dibuat sebanyak mungkin pada lapisan. Pendekatan ini dapat bekerja untuk beberapa struktur, biasanya diperlukan untuk menyeimbangkan kemampuan dalam membawa beban dengan sejumlah orientasi arah yang berbeda, seperti 0° , $+45^\circ$, -45° , dan 90° . Gambar 2.5 menunjukkan laminasi dari *carbon/epoxy*. Laminasi yang memiliki jumlah sama pada orientasi arah 0° , $+45^\circ$, -45° , dan 90° disebut quasi-isotropik laminasi, karena membawa beban yang sama di keempat arah (Daniel, 2006).



Gambar 2.5 Lamina dan laminat (Daniel, 2006)

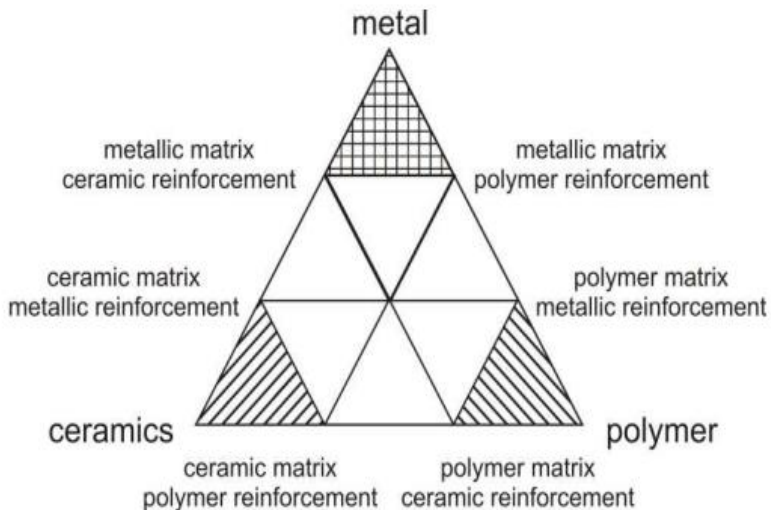
Laminat mempunyai ketebalan dan dapat terdiri dari material yang berbeda. Karena orientasi sumbu material bervariasi dari *ply* ke *ply*, lebih mudah untuk menganalisis laminasi menggunakan sistem tetap umum atau koordinat (x , y , z) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Orientasi *ply* yang diberikan oleh sudut antara referensi sumbu x dan material utama sumbu (orientasi serat atau arah) dari *ply*, diukur dalam arah berlawanan jarum jam pada bidang x - y . Laminasi komposit mengandung dua atau lebih berbagai jenis material. Misalnya, komposit laminasi dapat dibuat dari *glass/epoxy*, *carbon/epoxy* dan *aramid/epoxy* ditumpuk bersama dalam urutan tertentu. Dalam beberapa kasus mungkin menguntungkan untuk menggabungkan berbagai jenis serat, seperti kaca dan karbon atau aramid dan karbon, dalam *ply* searah. Komposit tersebut dikenal sebagai komposit hibrida *intraply*. Laminasi komposit ditetapkan dengan cara yang menunjukkan jumlah, jenis, orientasi, dan urutan susunan lapisan. Konfigurasi laminasi komposisi *ply* disebut *lay-up*. Konfigurasi yang menunjukkan komposisi *ply*, lokasi atau urutan yang tepat dari berbagai *ply* disebut *stacking sequence* (Daniel, 2006).



Gambar 2.6 *Multidirectional* laminat dan referensi sistem koordinat (Daniel, 2006)

2.2 Matriks

Matriks pada komposit merupakan fasa yang memberikan bentuk pada struktur komposit dengan cara mengikat penguat atau serat secara bersama. Matriks secara umum memiliki fungsi mengikat penguat atau serat menjadi satu kesatuan struktur, melindungi penguat atau serat dari kerusakan akibat kondisi lingkungan, tetap stabil setelah proses manufaktur, mentransfer dan mendistribusikan tegangan atau beban kerja ke penguat atau serat secara merata. Pemilihan material matriks dan penguat atau serat memainkan peranan penting dalam menentukan sifat mekanik dan sifat komposit. (Chawla, 2013). Matriks yang sering digunakan pada komposit yaitu matriks logam, matriks keramik dan matriks polimer. Gabungan matriks dan penguat atau serat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 menghasilkan komposit yang mempunyai kekuatan dan kekakuan lebih tinggi (Pastuszak, 2013).



Gambar 2.7 Matriks pada komposit (Pastuszak, 2013)

2.2.1 *Metal Matrix Composite (MMC)*

Umumnya MMC terdiri dari logam atau paduan logam yang dibentuk menjadi matriks dan penguatan terbuat dari bahan logam atau keramik. Selain itu, sifat MMC seperti kekuatan spesifik yang tinggi dan kekakuan yang tinggi. Terutama, kemampuan untuk mengontrol ekspansi termal dalam aplikasi yang melibatkan perangkat elektronik, mengurangi koefisien linear ekspansi termal, konduktivitas listrik dan termal tinggi (menyediakan konduktivitas termal dan ketahanan aus. Selanjutnya, seseorang dapat mencantumkan orang lain termasuk melintang baik properti, stabilitas suhu, peningkatan karakteristik kelelahan siklik atau kontaminasi rendah. Seperti aluminium-karbon (Al-C) yang memiliki keuntungan utama yaitu untuk memastikan efek minimum dari ketegangan pada tekanan termal siklik. Contoh selanjutnya adalah aluminium-aluminium oksida (Al-Al₂O₃) yang sering digunakan pada material di jalur transmisi listrik, konstruksi kapal-baling, torpedo, dan badan lainnya benda bawah air karena kekakuan yang tinggi dan kekuatan dan rendah koefisien dari ekspansi termal.

2.2.2 *Ceramic Matrix Composite (CMC)*

CMC memiliki sifat fisik dan kimia terbaik dalam aplikasi di mana produk adalah berat ringan dan memiliki kekuatan tinggi pada suhu tinggi (di atas 800°C) dan resistensi yang sangat besar terhadap korosi dan erosi kimia. Hal tersebut ditandai dengan kekerasan tinggi, sifat non-magnetik, ketahanan aus dan koefisien ekspansi termal yang rendah. Satu hal mengenai permasalahan yang telah terpecahkan adalah tentang memberikan penguatan yang memadai untuk memperkuat matriks rapuh. Saat ini, material yang paling terkenal dan paling sering digunakan dari komposit dengan matriks keramik adalah sebagai berikut antara lain matriks aluminium oksida (Al₂O₃-SiC, Al₂O₃-ZrO₂, Al₂O₃-SiC-ZrO₂, Al₂O₃-SiC), matriks silikon nitrida (Si₃N₄-TiN, Si₃N₄-SiC), dan matriks silikon karbida (SiC-SiC, SiC-MeB₂, SiC-TiB₂).

2.2.3 *Polymer Matrix Composite (PMC)*

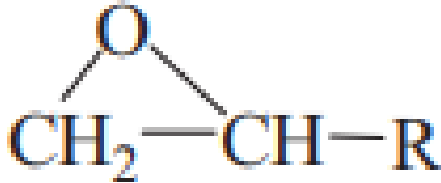
PMC secara struktural jauh lebih kompleks daripada MMC atau CMC. Polimer memiliki kekuatan dan modulus yang lebih rendah dan batas suhu penggunaan yang lebih rendah. Paparan sinar ultraviolet yang berkepanjangan dan beberapa pelarut dapat menyebabkan degradasi sifat polimer. Karena ikatan kovalen yang dominan, polimer umumnya merupakan konduktor panas dan listrik yang buruk. Namun demikian, polimer umumnya lebih tahan terhadap bahan kimia daripada logam. Secara struktural, polimer adalah molekul mirip rantai raksasa (karenanya makromolekul namanya) dengan atom karbon terikat kovalen yang membentuk tulang punggung rantai. Proses pembentukan molekul besar dari yang kecil disebut polimerisasi; yaitu, polimerisasi adalah proses penyatuan banyak monomer, blok bangunan dasar, bersama untuk membentuk polimer. Beberapa contoh PMC yaitu *polypropylene*, *polyamide*, *polycarbonate*, *polysulfon*, *polisulfon fenyl*, *vinil ester*, *polybutadiena*, *epoxy*, *amino (urea, melamin)*, *fenol (resols, novols)* (Pastuszak, 2013).

2.3 Resin Epoksi

Resin epoksi adalah resin *thermosetting* dimana sifatnya tergantung pada kombinasi spesifik dari jenis resin epoksi dan *curing* agen yang digunakan. Karena sifat mekanik yang sangat baik dan sifat adhifitas tinggi untuk banyak substrat, panas yang baik dan resistensi kimia, saat ini resin epoksi secara intensif digunakan di berbagai bidang, di mana mereka bertindak sebagai bahan yang diperkuat, perekat dan pelapis berkinerja tinggi. Struktur kimia epoksi ditunjukkan pada Gambar 2.8. Epoksi yang bertaut silang sangat kaku dan rapuh serta memiliki resistensi yang relatif buruk untuk retak inisiasi dan pertumbuhan, yang membatasi penggunaannya di banyak aplikasi.

Banyak upaya telah dilakukan untuk meningkatkan sifat fisik dengan menggunakan penguatan agen. Sebagai contoh adalah epoksi yang dikombinasikan dengan serat karbon. Epoksi yang dikombinasikan dengan komposit serat karbon digunakan

lebih luas untuk struktur dan mempunyai kinerja tinggi karena kekakuan spesifik yang tinggi secara keseluruhan dan sifat kekuatan yang sangat tinggi (Jin, 2015).



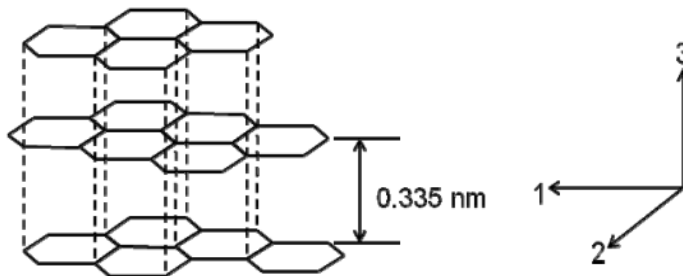
Gambar 2.8 Struktur kimia resin epoksi (Jin, 2015)

2.4 Serat Karbon

Serat karbon didefinisikan sebagai serat yang mengandung setidaknya 92 wt% karbon, sedangkan serat yang mengandung di setidaknya 99 wt% karbon biasanya disebut serat grafit. Serat karbon umumnya memiliki sifat tarik yang baik, kepadatan rendah, termal tinggi dan stabilitas kimia dengan tidak adanya pengoksidasi agen, konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta resistensi terhadap rangkai yang sangat baik. Serat karbon secara ekstensif digunakan pada komposit dalam bentuk tekstil tenun, *prepreg* dan serat kontinu. Bagian komposit dari serat karbon dapat diproduksi melalui *tape winding*, *pultrusion*, *compression molding*, *vacum bagging*, *liquid molding* dan *injection molding*.

Dalam hal sifat mekanik, serat karbon dapat diklasifikasikan ke dalam modulus ultra tinggi (>500 GPa), modulus tinggi (>300 GPa), modulus menengah (>200 GPa) dan modulus rendah (100 GPa). Serat karbon juga dapat diklasifikasikan berdasarkan pada suhu pengolahan panas akhir, ke dalam tipe I (perlakuan panas 2.000°C), tipe II (perlakuan panas 1.500°C) dan tipe III (perlakuan panas 1.000°C).

Struktur atom dari serat karbon mirip dengan grafit, yang terdiri dari lapisan atom karbon (lembaran grafena) disusun dalam pola heksagonal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Tergantung pada proses manufaktur, bidang lapisan dalam serat karbon dapat berupa grafitik atau struktur hibrida. Di daerah kristal grafitik, bidang lapisan ditumpuk satu sama lain. Atom pada bidang struktur kristal secara kovalen terikat melalui ikatan. Dalam satu kristal grafitik, jarak antara dua lapisan grafena adalah sekitar 0,335 nm (Huang, 2009).



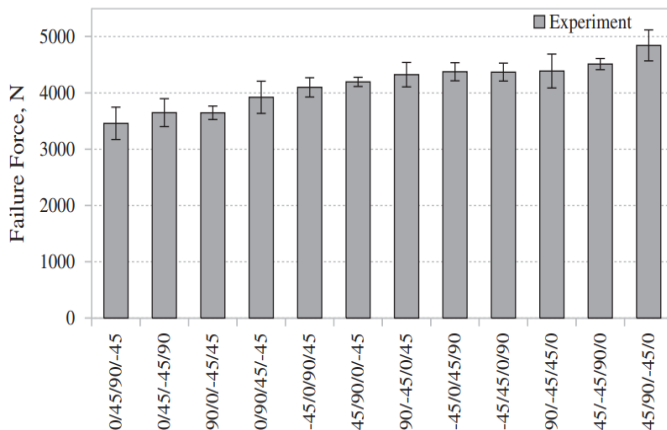
Gambar 2.9 Struktur kristal dari serat karbon (Huang, 2009)

2.5 Pengaruh Variasi Arah Serat

Dalam kasus laminasi komposit dengan *lap-joint*, salah satu faktor yang bekerja adalah urutan susunan, sebagian besar penelitian yang disajikan dalam literatur tidak memisahkan antara efek global (membran dan modifikasi kekakuan saat tekuk) dan efek lokal (orientasi *ply* di dekat lapisan perekat). Studi yang dilakukan oleh Purimpat (2012) berkaitan dengan karakterisasi efek tersebut dalam kasus *single lap-joint carbon/epoxy* laminat. Dalam rangka untuk mengisolasi efek lokal, urutan susunan quasi-homogen dan quasi-isotropik tertentu digunakan. Ketika kekakuan sifat dipertahankan secara konstan, variasi kekuatan lebih dari 30% yang diamati dengan memperhatikan posisi terjauh dari orientasi lapisan 0° . Pengujian dilakukan dengan laminasi simetris pada tekuk menunjukkan bahwa kekakuan saat tekuk juga memainkan peran penting dalam perilaku sambungan.

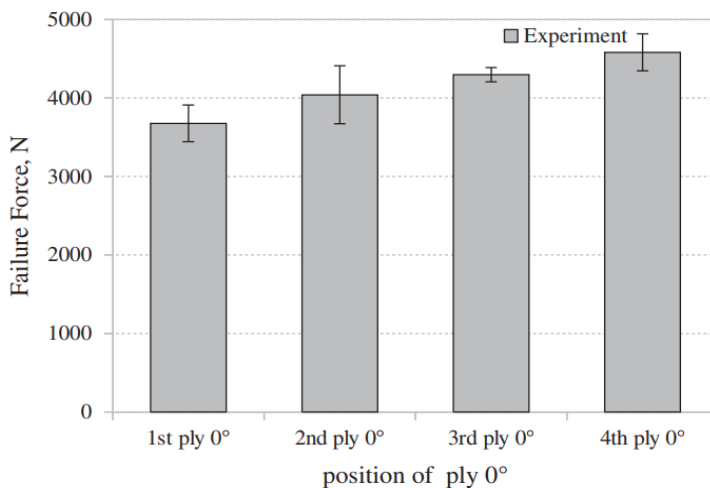
Perilaku patahan delaminasi terjadi antara lapisan dan juga tergantung pada posisi *out-of-plane* dari lapisan 0° laminasi dekat lapisan perekat.

Tipe kedua dari urutan susunan yang dipilih dalam penelitian ini adalah urutan yang disebut quasi-isotropik yang terdiri dari mengulangi lapisan 0° , 45° , 90° dan -45° . Prinsipnya adalah menggunakan masing-masing orientasi dengan jumlah yang sama, bervariasi dengan orientasi 45° antara dua *ply* berturut-turut, dan simetri secara urutan. Diperoleh jenis urutan $[45/90/-45/0]_N$, N sebagai nilai *integer* tergantung pada ketebalan yang diinginkan. Dalam semua hasil eksperimental yang dilakukan oleh Purimpat (2012) pada Gambar 2.10 diringkas hasil dalam hal kegagalan pada kekuatan sampel diuji, diurutkan mulai dari yang terendah sampai tertinggi. Nilai dari kekuatan kegagalan tampaknya berkorelasi dengan posisi lapisan 0° dalam empat lapisan yang dipelajari. Lapisan ini lebih jauh dari antarmuka dengan perekat. Jika tumpukan diurutkan berdasarkan jarak dari lapisan 0° , didapatkan empat kategori, termasuk kekuatan kegagalan ditunjukkan pada Gambar 2.11. Pengaruh posisi lapisan 0° menjadi jelas dalam kasus ini.



Gambar 2.10 Kekuatan kegagalan pada beberapa *stacking sequence* (Purimpat, 2012)

Pada setiap kasus terdapat beberapa kegagalan dari laminat, antara lain delaminasi, kegagalan intralaminar, patah serat, dan rusaknya matriks. Hal tersebut juga mengilustrasikan retak pada setiap posisi lapisan 0° dengan perhitungan deviasi standar. Retak selalu dimulai di tepi resin epoksi karena di daerah ini tekanan untuk mengelupas dan tekanan geser adalah yang tertinggi. Tergantung pada distribusi *plies*, retak ini kemudian akan mengikuti jalur yang lebih atau kurang kompleks di substrat. Pada akhirnya diamati bahwa setiap orientasi dikaitkan dengan jenis kegagalan tertentu, seperti pada lapisan 90° ini dilintasi matriks dengan retak melintang dan sebagian muncul hampir transparan. Sementara pada lapisan 45° dan -45° menyebabkan retak pada sambungan dan terpisah menjadi dua bagian dengan proporsi yang lebih besar atau lebih rendah dari rusak pada serat. Pada lapisan 0° , akhirnya, masih terjadi retak intralaminar yang secara otomatis mengakibatkan kegagalan. Kombinasi yang berbeda dari lapisan serta mode kegagalan mengarah kepada jenis mekanisme kegagalan (Purimpat, 2012).



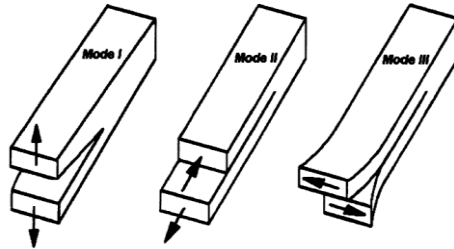
Gambar 2.11 Kekuatan kegagalan di berbagai posisi lapisan 0°
(Purimpat, 2012)

2.6 Delaminasi

Delaminasi adalah pemisahan dua lapisan yang berdekatan pada komposit laminat dan merupakan salah satu mode kegagalan yang paling kritis pada komposit laminat. Bahkan, delaminasi merupakan masalah penting dalam evaluasi komposit laminat untuk durabilitas dan toleransi kerusakan pada laminat. Pada mulanya dilakukan metode uji geser pendek-balok atau *short-beam shear* (SBS) yang secara eksperimental digunakan untuk mengukur kekuatan interlaminar dari komposit. Namun, ketika SBS digunakan pada komposit seperti *carbon/epoxy*, tingkat kesulitan yang cukup besar ditemui pada data eksperimental. Hal ini dikarenakan kompleksitas mode kegagalan yang diamati dalam spesimen. Metode uji interlaminar baru telah dikembangkan karena ketidakpuasan terhadap SBS dan kebutuhan untuk lebih lengkap dalam karakterisasi delaminasi. Sebagian besar metode ini berdasarkan pendekatan mekanik patahan dengan tingkat pelepasan energi regangan kritis. Secara umum delaminasi pada komposit dikembangkan menjadi satu atau kombinasi dari tiga mode dasar patahan interlaminar. Mode tersebut adalah mode I, mode buka, mode II, mode geser pada bidang, dan mode III, mode geser keluar bidang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.

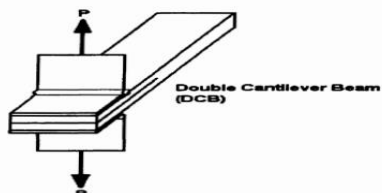
Banyak aspek delaminasi telah dipelajari, termasuk berbagai mode uji untuk mode I, mode II, mode III dan mode campuran, dengan memperhatikan pengaruh dari material, lingkungan, parameter pengujian, orientasi serat, urutan susunan, dan sebagainya. Pemahaman mengenai asal-usul fisik delaminasi komposit dan permodelan delaminasi diperlukan. Mode kegagalan dapat terjadi dikarenakan banyak faktor, seperti orientasi *ply*, *stacking sequence* dan ketebalan spesimen. Pemahaman tentang sifat delaminasi dan permodelan teoritis berdasarkan fundamental akan sangat mengurangi jumlah percobaan delaminasi. Selain itu, permodelan teoritis dapat membantu kita untuk memahami mekanisme patahan dan

parameter material sangat penting dalam mengontrol sifat patahan dari material (Ding, 2000).



Gambar 2.12 Mode dasar delaminasi (Ding, 2000)

Mode I delaminasi telah diperlakukan sebagai bentuk yang paling penting dari karakterisasi delaminasi. *Double Cantilever Beam* (DCB), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 adalah pengujian yang paling umum yang digunakan untuk uji delaminasi mode I. Tujuan dari pengujian *Double Cantilever Beam* (DCB) yaitu mengamati karakterisasi delaminasi dari komposit dan telah di standarisasi oleh ASTM. Konsep dari DCB yaitu diawali dari uji pembelahan komposit untuk mengetahui mekanika kegagalan dan delaminasi. Dari pengujian tersebut, dievaluasi ketangguhan pada patahan dengan sambungan adhesif pada mode I. Selanjutnya pengujian dilakukan menggunakan banyak aspek, seperti pengaruh konstituen dari material pada ketangguhan terhadap patahan interlaminar (Ding, 2000).



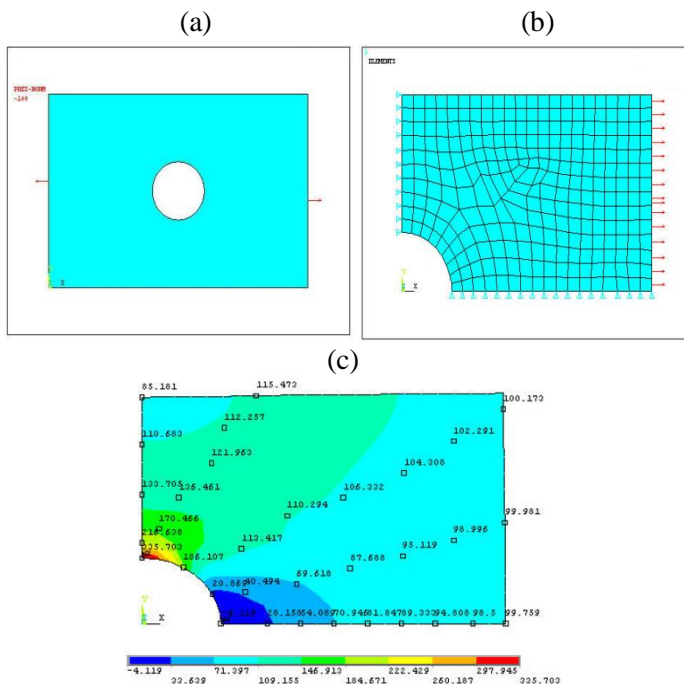
Gambar 2.13 Uji *double cantilever beam* (DCB)
(Ding, 2000)

2.7 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) adalah metode numerik untuk memecahkan diferensial ataupun persamaan integral. Metode dasarnya terdiri dari asumsi kontinu dalam bentuk fungsi yang digunakan untuk solusi dan mendapatkan parameter fungsi dengan cara mengurangi kesalahan pada solusi. Berikut adalah beberapa langkah dari formulasi elemen hingga: (I) *pre-processing* yang mencakup generasi *mesh* (II) mendapatkan sistem persamaan yang dirakit, dimana matriks unsur dan vektor perlu dievaluasi (III) menerapkan kondisi batas (IV) memecahkan sistem linear persamaan dan (v) *post-processing*. Dalam perhitungan elemen hingga, sering dibutuhkan perkiraan yang akurat dari derivatif variabel utama. Sebagai contoh, dalam bidang tekanan atau analisis bidang regangan, yang perlu untuk dihitung adalah komponen *displacement* dari *node*. Namun dalam banyak kasus regangan dan tegangan adalah komponen utama, yang dihitung melalui derivatif dari *displacement*. Sebagai solusi elemen hingga yang hanya menyediakan solusi interpolasi yang hasilnya tepat pada *node* dan perkiraan perhitungan. Akurasi tersebut jarang terjadi, namun secara umum ditemukannya nilai yang dihitung dari variabel utama paling akurat dalam titik *node*. Oleh karena itu, penyederhanaan dilakukan dengan diasumsikan bahwa nilai nodal elemen telah tepat. Diamati bahwa perkiraan derivatif setidaknya akurat pada *node*. Dengan demikian, pusat elemen linear diambil sebagai posisi optimal untuk *sampling* derivatif pertama.

Sebagai contoh untuk mengetahui tegangan di seluruh domain, dipertimbangkan permasalahan pelat dengan lubang yang dimuat oleh beban tarik yang terdistribusi secara merata seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 (a). Masalah ini telah diselesaikan melalui ANSYS, sebuah perangkat lunak komersial dengan FEM. Karena permasalahan simetris, seperempat pelat perlu dilakukan analisis. Pada garis simetri, *traction* dan *normal displacement* dari komponen akan menjadi nol. Gambar 2.14 (b)

menunjukkan elemen terbatas dari *mesh* dan *boundary condition*. Di sini, elemen segiempat telah digunakan. Gambar 2.14 (c) menunjukkan kontur tekanan longitudinal. Tegangan tarik sebesar 100 MPa dan dapat diperhatikan bahwa dalam domain yang jauh dari tekanan lubang mulai mendekati nilai hasil. Tegangan pada daerah yang bertegangan tinggi berkonsentrasi di dekat titik vertikal tertinggi lingkaran. Apabila didapat satu kontur komponen tegangan, maka tekanan akan bernilai setara (Dixit, 2017).



Gambar 2.14 Sebuah pelat dengan lubang yang diberi pembebanan (a) ditarik pada kedua sisi (b) digunakan *mesh* sebagai pemecahan seperempat bidang pelat (c) diterapkan kontur tegangan longitudinal (Dixit, 2017)

2.8 Analisis Numerik Delaminasi

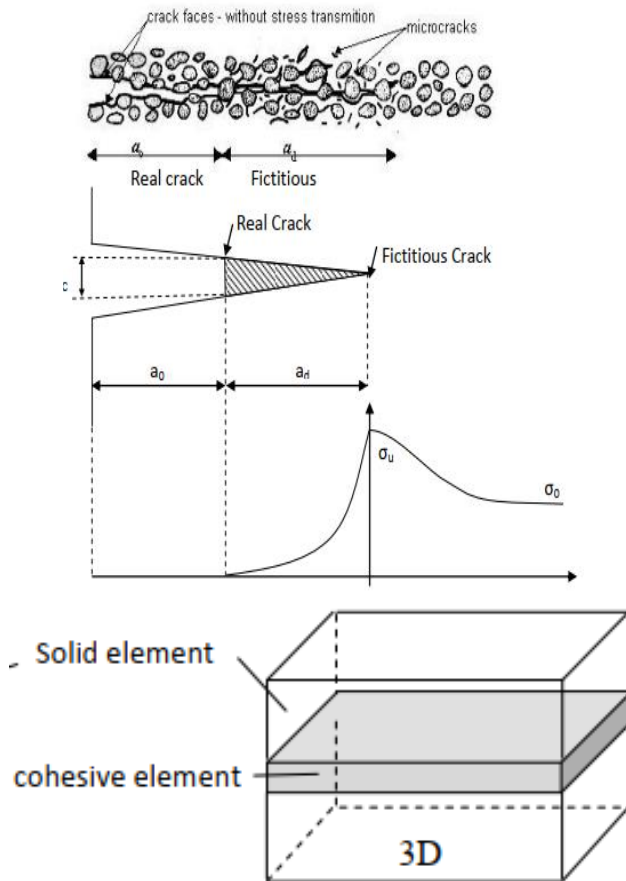
Delaminasi dapat dianalisis dengan menggunakan model kerusakan kohesif dan mekanika fraktur. Model kerusakan kohesif mengimplementasikan undang-undang konstitutif antar muka yang didefinisikan dalam hal variabel kerusakan dan hukum evolusi kerusakan. Dalam pendekatan mekanika fraktur, propagasi delaminasi yang ada dianalisis dengan membandingkan jumlah laju pelepasan energi atau *energy release rate* (ERR) dengan ketangguhan retak antarmuka. *Energy release rate* atau bisa diartikan sebagai laju pelepasan energi, disimbolkan dengan G , merupakan laju dimana sebuah material mengalami kehilangan energi, ketika suatu material mengalami kegagalan mekanik material (*fracture mechanic material*), dimana G memiliki satuan energi per luasan area. Tingkat pelepasan energi secara matematis dipahami sebagai penurunan total energi potensial yang diukur dengan kenaikan area permukaan fraktur. Ketika kondisi mode campuran terlibat, dekomposisi total ERR ke dalam komponen mode I, mode II, dan mode III menjadi diperlukan karena ketergantungan mode campuran dari ketangguhan antarmuka. Sejumlah model berbasis mekanika patahan telah diusulkan dalam literatur untuk mempelajari delaminasi, termasuk model tiga dimensi dan model seperti balok sederhana.

Mekanika fraktur memungkinkan kita untuk memprediksi pertumbuhan retak atau cacat yang sudah ada sebelumnya. Dalam benda homogen dan isotropik yang mengalami kondisi pembebanan generik, retakan cenderung tumbuh dengan menekuk ke arah sedemikian rupa sehingga kondisi mode I murni di ujungnya dipertahankan. Sebaliknya, delaminasi pada komposit berlapis dibatasi untuk merambat di bidangnya sendiri karena ketangguhan antarmuka relatif rendah dibandingkan dengan bahan yang berdekatan. Karena celah delaminasi merambat dengan ujungnya yang maju dalam kondisi mode campuran, analisis ini memerlukan kriteria fraktur termasuk ketiga komponen mode (Barbero, 2014).

2.8.1 Cohesive Zone Model (CZM)

Model zona kohesif atau *cohesive zone model* (CZM) adalah metode untuk mengamati kegagalan pada suatu material atau sepanjang *interface* material. Zona kohesif mewakili perluasan ujung retak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15. Sementara retak konvensional tidak menanggung transmisi tegangan diantara permukaan retakan. Patahan fiksi dideskripsikan oleh zona kohesif sebagai lokasi aktif atau tegangan interaktif diantara sepasang permukaan virtual. Proses patahan digambarkan sebagai penurunan progresif kekuatan material di dekat permukaan virtual. Traksi kohesif di antara retak permukaan, termotivasi oleh kekuatan antaratomik, sebagai bentuk perlawanan dari retak propagasi. Di bawah pemuatan eksternal, struktur atom dari perubahan material digambarkan sebagai variasi dalam traksi kohesif. Sampai jumlah tertentu mengenai pemisahan antara permukaan virtual, traksi kohesif mengikuti tren meningkat. Setelah pemisahan kritis tercapai, traksi kohesif menurun menuju nol.

Ketika pinggir dari pemisahan antar permukaan berkurang, permukaan virtual, atau permukaan kohesif, terpisah satu sama lain dan mendefinisikan sebagai formasi dari retak makroskopis pada lokasi. Keadaan tegangan antara permukaan kohesif berkembang sesuai dengan hukum pelunakan material tertentu, yang disebut hukum kohesif, atau hukum pemisahan traksi. Dimana traksi kohesif menurun ke nol dan ditemukan ujung retak yang asli. CZM dapat diimplementasikan dalam analisis elemen yang terbatas sebagai kondisi batas campuran, terhadap traksi dari *displacement* pada batas antarmuka. Elemen kohesif dua-dimensi dan tiga-dimensi untuk aplikasi di bidang yang berbeda. Hilangnya kohesi akibat retak formasi atau perpanjangan dapat dipandang sebagai penurunan progresif dari material dan tegangan akan menekan di permukaan yang berdekatan (Jiang, 2010).



Gambar 2.15 Zona kohesif (Jiang, 2010)

2.8.2 Virtual Crack Closure (VCC)

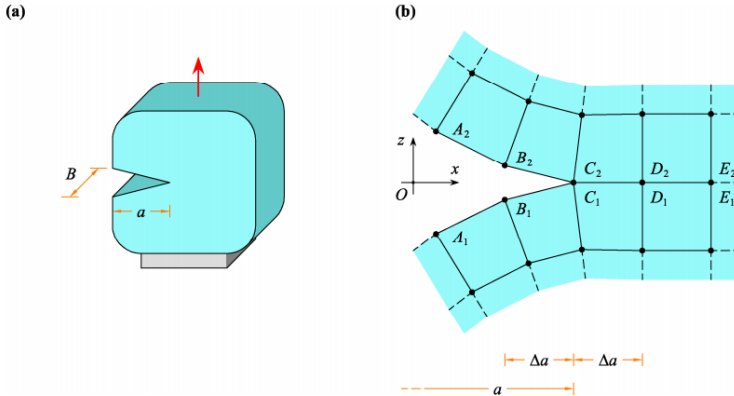
Teknik pendekatan retak virtual atau *virtual crack closure* (VCC) adalah metode untuk menghitung tingkat pelepasan energi atau *energy release rate* (ERR) ketika menganalisis masalah patahan melalui metode elemen hingga (FEM). Teknik ini

didasarkan pada implementasi numerik dari pendekatan integral dari retak Irwin dan kemudian diperluas menjadi masalah tiga dimensi. Dalam beberapa tahun terakhir, Teknik VCC digunakan sebagai metode studi tentang masalah patahan mode campuran, seperti delaminasi komposit dan patahan *interfacial* antara material yang berbeda. Dalam kasus ini, Teknik VCC digunakan untuk menghitung tidak hanya total ERR, tetapi juga kontribusi dari tiga mode patahan.

Sebagai contoh, komponen dengan patahan asimetris dikenakan kondisi beban tertentu dalam hal ini teknik VCC konsisten dalam memprediksi secara fisik, nilai negatif untuk kontribusi modal ke ERR. Dengan fokus pada masalah patahan mode campuran I atau II, pengembangan teknik VCC mode I dan II dengan ERR berkontribusi pada pekerjaan yang dilakukan dalam proses dua langkah sesuai yang didefinisikan pada penutupan retak yang hampir diperpanjang. Selain itu, prosedur implementasi didasarkan komputasi fleksibilitas koefisien. Efektifitas metode yang diusulkan kemudian diuji dengan mempertimbangkan masalah delaminasi pada *double cantilever beam* (DCB). Keseluruhan ketebalan *beam* tetap konstan, sementara beberapa posisi delaminasi dianggap sebagai efek dari retak asimetri. Berfokus pada permasalahan mode I dan II dan mode campuran, pengembangan teknik VCC berkontribusi sebagai perhitungan dari ERR menggunakan standar teknik VCC. Dengan demikian, teknik VCC menunjukkan kemampuan untuk memberikan prediksi fisik secara konsisten.

Diberikan permasalahan dari suatu bidang dua dimensional (bidang tegangan atau bidang regangan) pada sebuah komponen elastis dengan lebar B , dipengaruhi oleh patahan a dengan pembebanan dan kinematika kondisi batas seperti pada Gambar 2.16 (a). Sebuah model FEM digambarkan menggunakan *mesh* yang terbuat dari 4 elemen *node* seperti pada Gambar 2.16 (b). Diberikan A_1, B_1, C_1 dan A_2, B_2, C_2 dimana *node* diletakkan pada bawah patahan dan atas permukaan. Permukaan atas dan bawah *node* terikat bersama dengan batasan internal, yang dapat

dilepaskan secara progresif dengan tujuan mensimulasi tumbuhnya retakan. Posisi awal dari ujung retak terletak pada node C_1 atau bertepatan dengan node C_2 (Valvo, 2011).



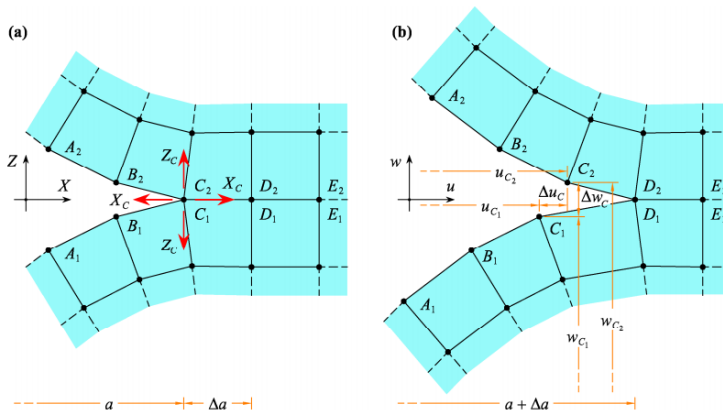
Gambar 2.16 Formulasi masalah: (a) komponen patahan
(b) FEM *mesh* (Valvo, 2011)

Menurut Irwin, energi yang hilang oleh virtual dengan ekstensi retak sama dengan kemampuan yang akan dilakukan untuk menutup retakan dengan kekuatan yang bertindak pada permukaan retak baru sebelum retak ekstensi. Dalam kerangka FEM yang diadopsi, laju pelepasan energi atau *energy release rate* (ERR) dapat dihitung sebagai

$$G = \frac{1}{2B\Delta\alpha} (X_c\Delta u_c + Z_c\Delta w_c) \quad (2.8)$$

dimana X_c dan Z_c sebagai kekuatan internal seperti pada Gambar 2.17 (a) berperan sebagai *node* ujung retak sepanjang arah x - dan z - berurutan, sementara pada Gambar 2.17 (b) Δu_c dan Δw_c sebagai *displacement* yang terjadi pada retak secara virtual

dengan panjang $\Delta\alpha$ (sama dengan ukuran pada arah x- dari elemen pada sebelah dari ujung retak) (Valvo, 2011).



Gambar 2.17 Standar teknik VCC: (a) kekuatan pada ujung retakan (b) *displacement* pada ujung retakan (Valvo, 2011)

Ketika retakan tumbuh dibawah kondisi patahan mode I dan II atau campuran digunakan persamaan

$$G = G_I + G_{II} \quad (2.9)$$

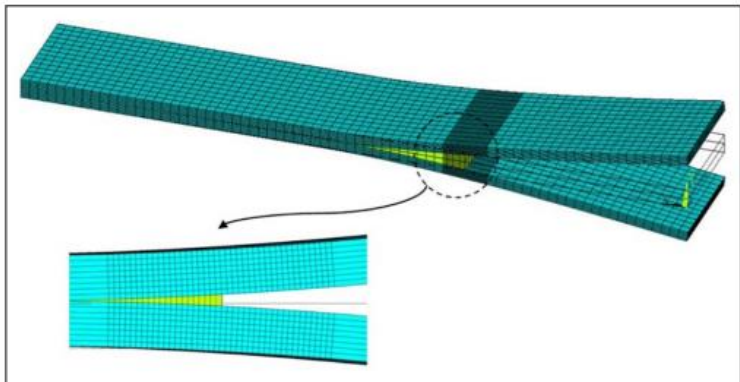
Dimana G_I dan G_{II} secara berurutan dari kontribusi mode I dan mode II menjadi *energi release rate* (ERR). Segaris dengan standar teknik VCC, kontribusi diidentifikasi secara praktis menjadi dua buah tambahan persamaan

$$G_{I\text{standar}} = \frac{Z_c \Delta w_c}{2B \Delta \alpha} \quad \text{dan} \quad G_{II\text{standar}} = \frac{X_c \Delta u_c}{2B \Delta \alpha} \quad (2.10)$$

Dimana Z_c dan X_c adalah kekuatan nodal sementara Δw_c dan Δu_c adalah *displacement* (Valvo, 2011).

2.9 Analisis Jumlah Elemen *Mesh*

Dimodelkan sebuah *double cantilever beam* (DCB) untuk menginvestigasi pengaruh dari tekuk pada *multidirectional* laminat dengan distribusi tingkat pelepasan energi di sepanjang ujung delaminasi. Investigasi serupa dilakukan untuk elemen patahan mode I interlaminar dan mode II interlaminar untuk mengidentifikasi pengaruh dari sambungan yang berhubungan dengan propagasi retak seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18. Namun, hal ini juga diketahui bahwa *critical force* dan *displacement* yang diperoleh tergantung pada dimensi dari elemen (Daricik, 2019).



Gambar 2.18 Model numerik dengan *mesh* pada ujung retakan (Daricik, 2019)

Ukuran elemen sepanjang ujung retakan sangat berpengaruh terhadap reaksi kekuatan dari model patahan. Oleh karena itu, analisis sensitivitas *mesh* diperlukan sebelum analisis fraktur dilakukan. Namun, tekanan osilasi atau perpindahan di sekitar celah adalah fenomena lain yang terjadi sebagai akibat dari singularitas fungsi tegangan. Osilasi perilaku tekanan menyebabkan divergensi tingkat pelepasan energi regangan yang ditentukan pada ujung retak. Tegangan osilasi di ujung retak lebih

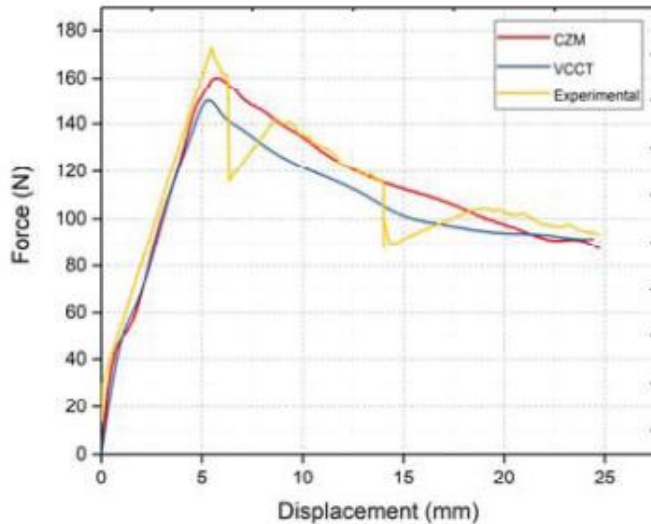
umum terjadi di antara dua lapisan dengan berbagai orientasi arah serat. Pengaruh tegangan osilasi membuat analisis sensitivitas *mesh* semakin penting untuk analisis patahan interlaminar. Dengan demikian, panjang elemen di sekitar ujung retakan (Δa) harus dipertimbangkan karena mempengaruhi jumlah *node* dan elemen seperti yang di contohkan pada Tabel 2.1 (Daricik, 2019).

Tabel 2.1 Contoh jumlah *node* dan elemen permodelan *double cantilever beam* (DCB) (Daricik, 2019)

		Δa				
		1	0.5	0.25	0.1	0.05
DCB	Nodes	27,300	31,500	39,900	65,100	107,100
	Elements	23,296	26,936	34,216	56,056	92,456

2.10 Penelitian Sebelumnya

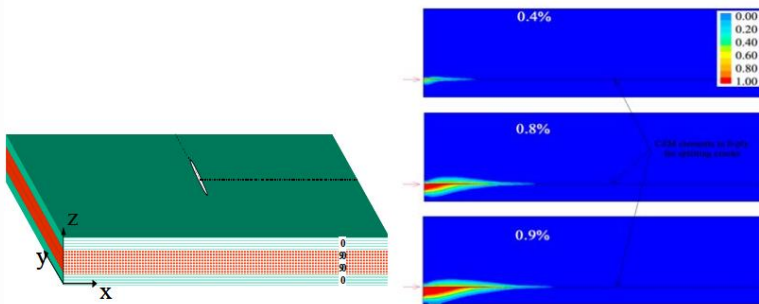
Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Chetan (2018) dengan metode CZM dan teknik VCC menggunakan spesimen *double cantilever beam* (DCB) untuk material CFRP dan resin epoksi. Terdapat 16 total lapisan unidireksional quasi-isotropik dengan variasi arah serat $[0/+45/90/-45/0/+45/90/-45]_s$. Didapatkan hasil dari simulasi dengan perbandingan eksperimental. Teknik VCC memiliki tren yang linier sampai beban maksimal dengan kurva yang tidak halus, sementara metode CZM didapatkan hasil kurva yang halus dengan kondisi yang berubah-ubah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19. Berdasarkan hal tersebut, metode CZM lebih cocok untuk mensimulasi retak pada struktur komposit dengan kondisi pembebanan kompleks.



Gambar 2.19 Perbandingan kekuatan dan *displacement* hasil eksperimental dan simulasi (Chetan, 2018)

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Abrate (2015) dengan menggunakan metode CZM sebagai prediksi kerusakan pada struktur komposit. Didapatkan hasil dengan keakuratan yang tinggi namun, mesh yang halus diperlukan. Ukuran elemen ditentukan dari panjang zona kohesif yang dapat diperkirakan dari rumus perkiraan sederhana. Pada saat ini analisis tersebut hanya dilakukan pada komponen dengan ukuran elemen kecil, misalnya permodelan kegagalan intralaminar dengan elemen kohesif yang memberikan representasi skenario kerusakan yang baik tetapi hampir tidak layak untuk struktur yang terlalu besar. Penelitian yang dilakukan oleh Ye (2011) memprediksi parameter kekuatan dari metode CZM dengan laminat tipe T700/QY8911 dan AS4/PEEK dan didapatkan hasil bahwa variasi dari kekuatan kohesif memiliki pengaruh yang besar juga dapat meningkatkan keakuratan simulasi beban dan *displacement*. Kemudian penelitian mengenai evolusi perusakan pada komposit laminat

dengan metode CZM juga dilakukan oleh Yang (2004). Gambar 2.20 menunjukkan evolusi kerusakan pada [0/90/90/0] laminasi dengan celah tajam di tengah dengan delaminasi dan retak. Pemisahan retak dimulai pertama di *ply* 0°. Pembelahan retak diketahui dari eksperimen untuk memulai di ujung celah dan propagasi paralel dengan arah dan ditentukan oleh elemen CZM sepanjang *ply* 0°. Parameter CZM yang sama digunakan untuk elemen antar *ply*.



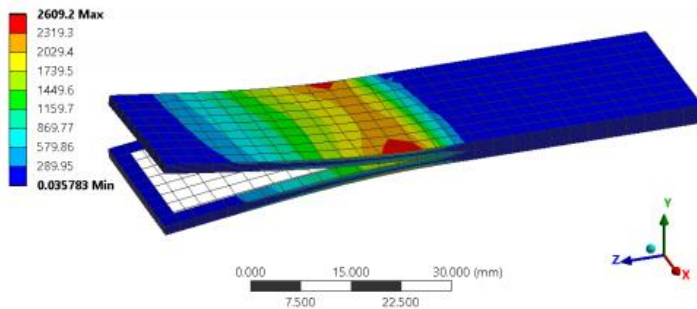
Gambar 2.20 Sebuah laminat [0/90]_s mengalami pertumbuhan delaminasi diantara *ply* 0° dan 90° (Yang, 2004)

Penelitian mengenai metode teknik VCC dilakukan oleh Xiao (2018). Proses delaminasi retak tunggal dan beberapa retak delaminasi disimulasikan dan terungkap dua mekanisme propagasi retak lebih lanjut. Hasil numerik dari perbandingan yang baik dengan hasil eksperimen. Dalam uji DCB, beban spesimen delaminasi meningkat secara linear, kemudian kekakuan mulai menurun, dan kurva *displacement* beban cepat mencapai ekstrem. Setelah melewati ekstrem, beban secara bertahap menurun. Penelitian menunjukkan bahwa metode teknik VCC dapat secara efektif mensimulasikan proses delaminasi komposit laminasi.

Penelitian menggunakan metode teknik VCC juga dilakukan oleh Khatir (2017) dengan tujuan mendeteksi delaminasi pada struktur *beam* 8 lapisan. Hasil yang didapatkan

yaitu fleksibilitas dari metode yang digunakan ditandai dengan tingkat keakuratan yang tinggi.

Selanjutnya penelitian Shindu (2019) dengan membandingkan studi numerik dari komposit pelat tiga dimensi dengan menggunakan metode CZM dan teknik VCC dimana spesimen terdiri dari *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) dan *glass fiber reinforced polymer* (GFRP). Hasil dari penelitian tersebut yaitu antara lain waktu komputasional untuk metode CZM lebih lama daripada teknik VCC dan spesimen GFRP lebih mudah terjadi delaminasi dibandingkan spesimen CFRP. Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Hudisteanu (2019) mengenai kegagalan interlaminar dengan pertumbuhan delaminasi pada komposit laminat. Hasil yang diperoleh adalah *displacement* pembukaan di ujung retak dan distribusi tegangan di lapisan laminasi komposit. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Distribusi tegangan ekuivalen pada laminat quasi-isotropik saat *displacement* awal (Hudisteanu, 2019)

Penelitian mengenai *onset* retakan dari adhesif dengan metode CZM dan teknik VCC dilakukan oleh Jokinen (2017). Analisis yang dihasilkan dari *cycle* eksperimental DCB, dimana pada analisis CZM ditemukan non-linearitas pada kegagalan *nodal* sementara teknik VCC tidak ditemukannya non-linearitas

tersebut. Hasil dari analisis mengungkapkan bahwa kekuatan kohesif dari CZM didapatkan pada nilai 50 MPa sementara penambahan kekuatan kohesif untuk teknik VCC sampai dengan nilai 100 MPa. Lebih jelasnya, *onset* patahan bergantung kepada metode simulasi yang digunakan. Penelitian yang dilakukan oleh Rarani (2019) menunjukkan bahwa beberapa faktor seperti akurasi, *run-time*, jumlah elemen, dan laju konvergensi sangat berpengaruh pada metode CZM dan teknik VCC. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2 mengenai perbandingan dari propagasi delaminasi pada spesimen DCB.

Tabel 2.2 Perbandingan faktor simulasi (Rarani, 2019)

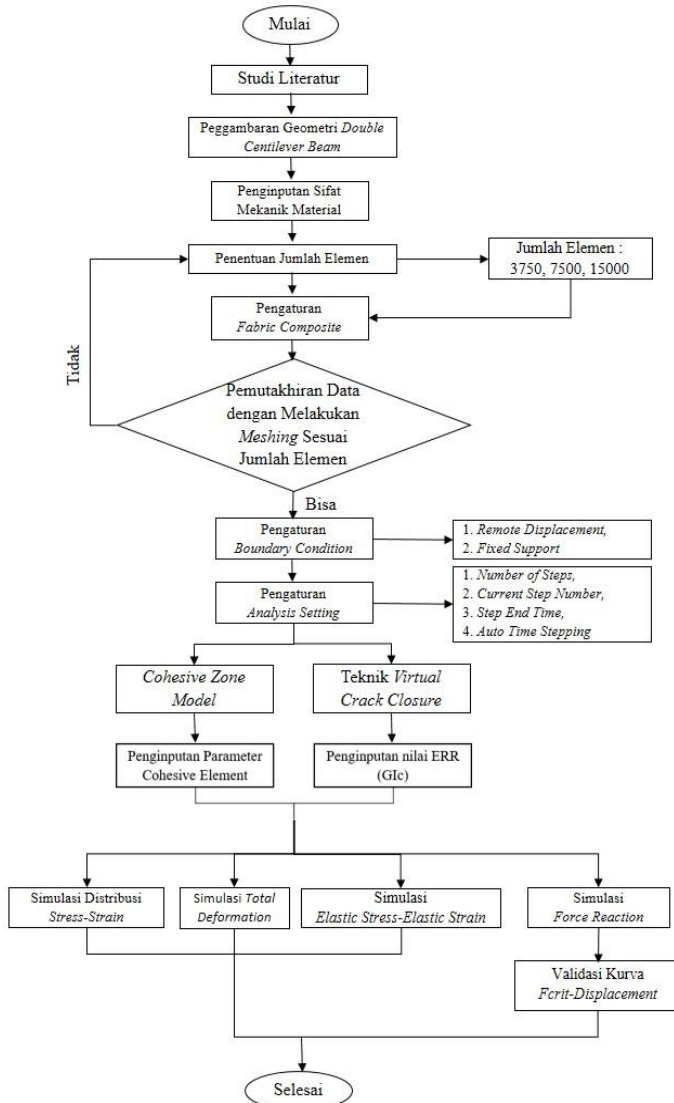
	Number and type of elements	Accuracy	Run-time (s)	Mesh dependency
VCCT (2D)	15,000 (CPE4)	Good	2136	High
VCCT (3D)	15,000 (C3D8R)	Good	7025	High
CZM (2D)	2630 (COH2D4, CPE4R)	Very good	142	Moderate
CZM (3D)	46,282 (C3D8R, COH3D8)	Very good	10,837	High
XFEM-VCCT (2D)	4845 (CPE4)	Good	1365	Moderate
XFEM-VCCT (3D)	30,000 (C3D8R, RNODE2D)	Good	13,034	Moderate
XFEM-CZM (2D)	2100 (CPE4R)	Excellent	835	Moderate
XFEM-CZM (3D)	30,000 (C3D8R, RNODE2D)	Excellent	40,928	Moderate

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam analisa delaminasi pada penelitian ini, terdapat beberapa tahap yang harus dilakukan untuk mendapatkan hasil yang sesuai. Langkah-langkah tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Spesifikasi Material Komposit

Dalam penelitian tugas akhir ini, material yang digunakan yaitu *Epoxy Carbon UD (CFRP)* bertipe *Prepeg Ply*. Data spesifikasi dari material yang digunakan pada penelitian ini terurai pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi material penelitian

<i>Material Properties</i>	<i>Direction</i>	Nilai
<i>Orthotropic Material Properties</i>		
Modulus Young (MPa)	X	121000
	Y	8600
	Z	8600
Rasio Poisson	XY	0.27
	XZ	0.40
	YZ	0.27
Modulus Geser (MPa)	XY	4700
	XZ	3100
	YZ	4700
<i>Orthotropic Stress Limit</i>		
<i>Tensile Properties</i> (MPa)	X	2231
	Y	29
	Z	29
<i>Compressive Properties</i> (MPa)	XY	-1082
	XZ	-100
	YZ	-100
<i>Shear Properties</i> (MPa)	XY	60
	XZ	32
	YZ	60
<i>Orthotropic Strain Limit</i>		
<i>Tensile Properties</i> (MPa)	X	0.0167
	Y	0.0032
	Z	0.0032
<i>Compressive Properties</i>	XY	-0.0108

(MPa)	XZ	-0.0192
	YZ	-0.0192
<i>Shear Properties</i> (MPa)	XY	0.012
	XZ	0.011
	YZ	0.012
<i>Exponential for Interface Delamination</i>		
Maximum Normal Traction, T_c (MPa)		80
Normal Separation Accross the Interface, d_1 (mm)		0.5
Shear Separation at Maximum Shear Traction, d_2 (mm)		0.5
<i>Energy Release Rate Critical</i>		
Mode-I (mJ/mm ²)		0.352
Dimensi Spesimen	Panjang = 150 mm	
	Panjang <i>initial crack</i> = 30 mm	
	Tinggi = 16 mm	
	Lebar = 25 mm	
	<i>Displacement</i> = 30 mm (Y dan -Y)	
Variasi Arah Serat 1		[0/+45/+45/0]2s
Variasi Arah Serat 2		[0/+45/90/-45]2s

3.3 Peralatan dan Perangkat Lunak Penelitian

Adapun perangkat yang digunakan pada penelitian simulasi numerik delaminasi komposit yang digunakan yaitu laptop dengan spesifikasi RAM 4 GB, CPU AMD A9 7th gen, 2,4 GHz, dan Windows x10 Pro 64. Untuk perangkat lunak yang digunakan untuk menggambar geometri *double cantilever beam* dengan menggunakan ANSYS *Design Modeller* R19.1 dan di *couple*

dengan menggunakan ANSYS ACP (*Pre*) R19.1 pada ANSYS *Workbench* R19.1.

3.4 Desain Penelitian

Pada desain penelitian simulasi delaminasi ini, untuk mencapai tujuan penelitian digunakan 3 jenis variabel, yaitu variabel bebas, variabel tetap dan variabel kontrol. Variabel tersebut dijelaskan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Desain penelitian

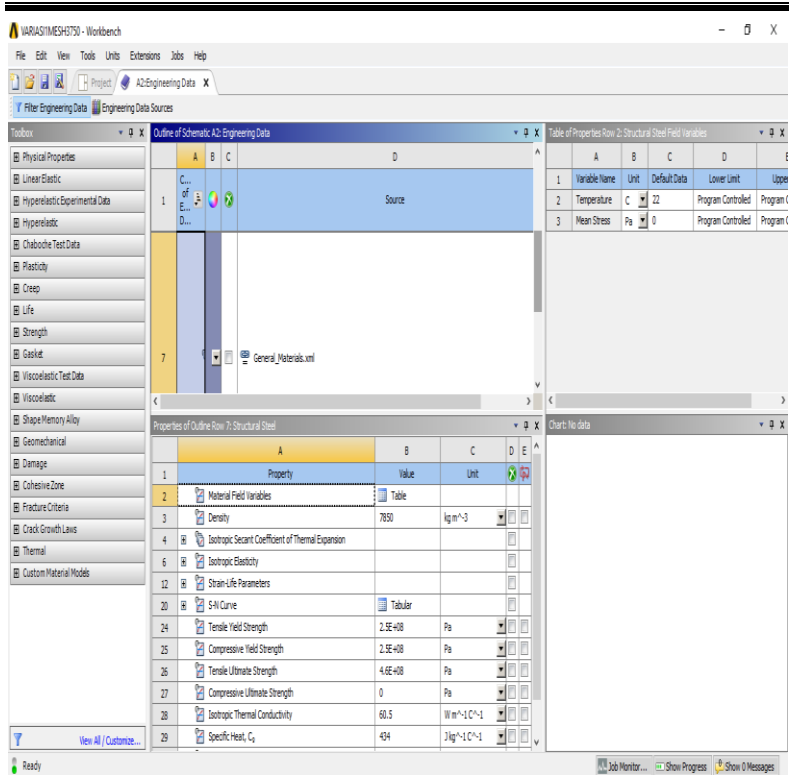
Variabel Bebas		Variabel Tetap	Variabel Kontrol
Variasi Arah Serat	Metode		
[0/+45/+45/0]2s	CZM	Mode Kegagalan, Jumlah Elemen, Orientasi Arah Serat, Orientasi	Karakteristik Delaminasi, Distribusi Tegangan, Distribusi Regangan, Kurva Tegangan-Regangan, <i>Critical Force</i>
	VCCT		
[0/+45/90/-45]2s	CZM	<i>Displacement, Fixed Support</i>	
	VCCT		

3.5 Tahapan Penelitian

Adapun penelitian simulasi delaminasi ini dibagi menjadi beberapa tahapan yang akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Input *material properties*

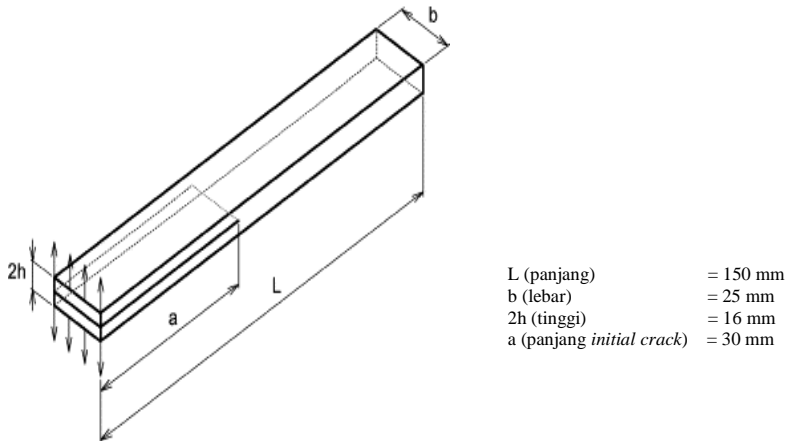
Pada penelitian ini digunakan material CFRP, untuk sifat mekanik dari material tersebut telah tersedia pada *database* ANSYS. Sehingga cukup dilakukan input data di bagian *Engineering Data Library* seperti pada Gambar 3.2.



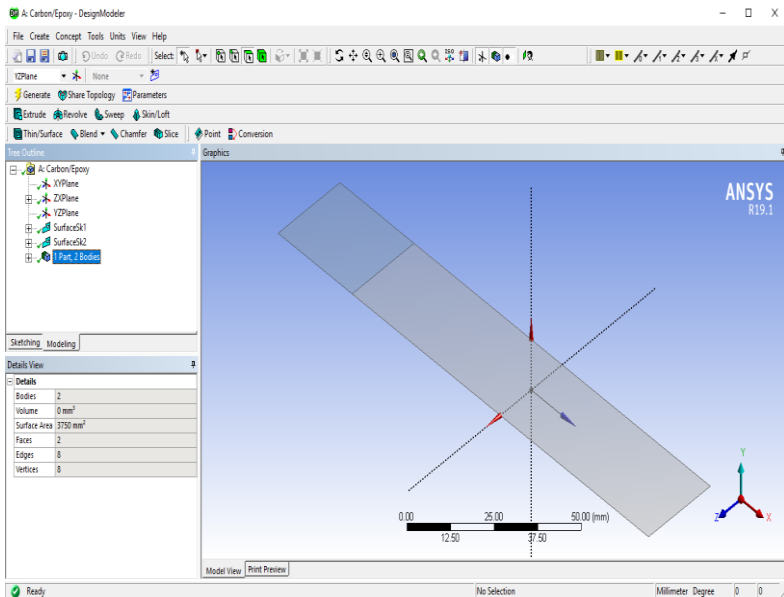
Gambar 3.2 Input sifat mekanik pada *Engineering Data Library*

2. Pembuatan geometri

Pembuatan untuk geometri untuk metode CZM dan teknik VCC dilakukan pada perangkat lunak ANSYS *Design Modeller* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Untuk desain dari geometri spesimen *double cantilever beam* (DCB) dapat dilihat pada Gambar 3.3.



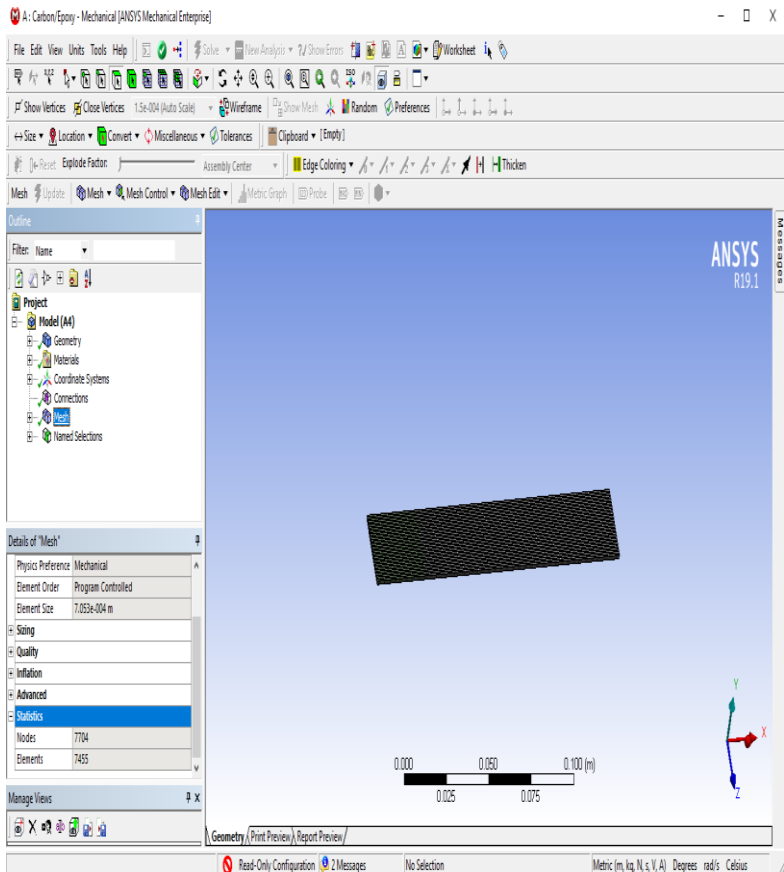
Gambar 3.3 Geometri spesimen *double cantilever beam* (DCB)



Gambar 3.4 Pembuatan geometri pada perangkat lunak ANSYS *Design Modeller*

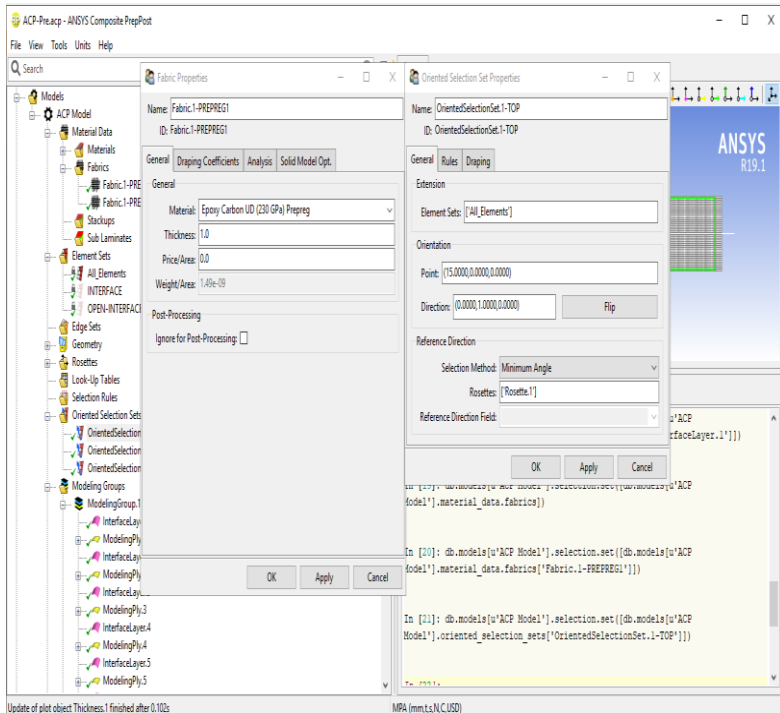
3. Menentukan Jumlah Elemen

Pada tahap ini, ditentukan jumlah elemen sesuai dengan metode yang digunakan. Pada penelitian ini dilakukan pengujian *mesh* menggunakan variabel jumlah elemen sebesar 3750, 7500 dan 15000 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 dengan parameter keluaran adalah *critical force*. Lebih lanjut akan dibahas pada bab selanjutnya.

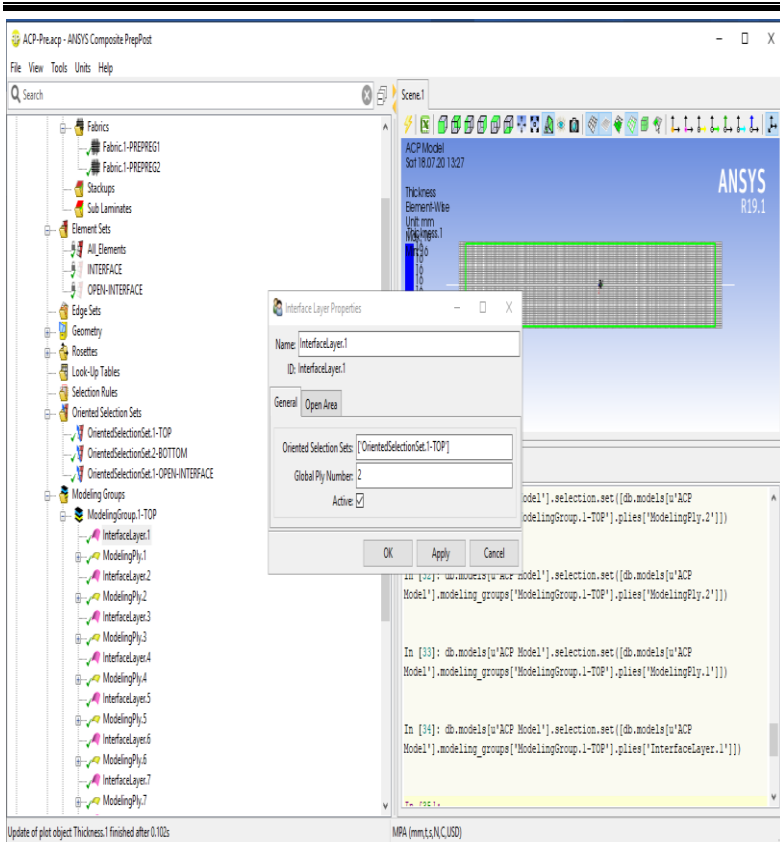


Gambar 3.5 Geometri setelah dilakukan *meshing*

4. Melakukan Preparasi Komposit pada ACP (*Pre*)
ACP (*Pre*) atau singkatan dari ANSYS *Composite PrepPost* merupakan sebuah teknologi dalam perangkat lunak ANSYS yang dapat digunakan untuk mempreparasi komposit beserta spesifikasi yang diinginkan seperti ketebalan *layer*, susunan laminat, material *fabric*, orientasi elemen sampai pengaturan *interface* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan 3.7. Preparasi yang dilakukan yaitu pengaturan jenis material dan serat komposit, mengatur orientasi arah serat, ketebalan dan *global coordinate system*.



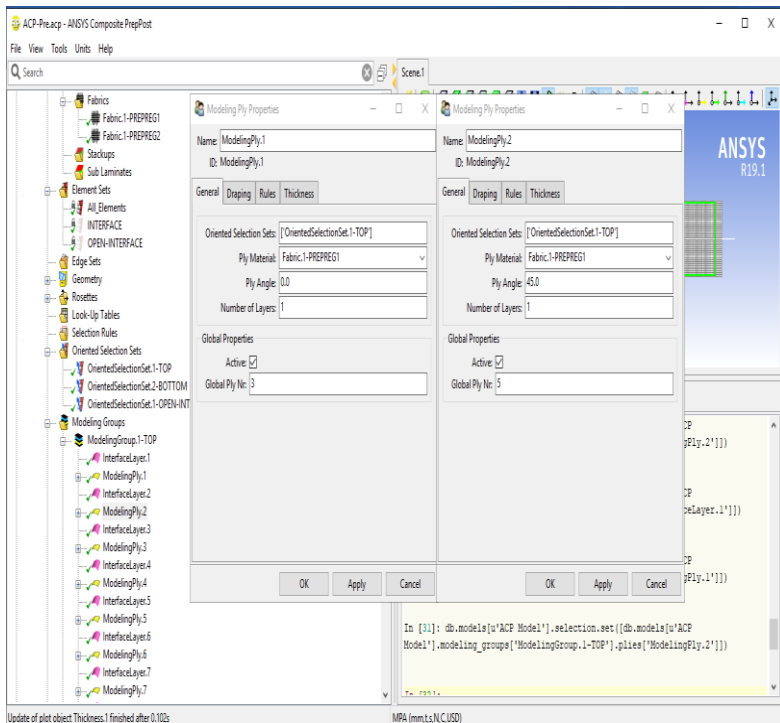
Gambar 3.6 Pengaturan material *fabric* dan orientasi elemen



Gambar 3.7 Pengaturan *Interface Layer Properties*

Pada penelitian ini terdapat 16 layer komposit laminat dengan variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/90/-45]_2s$. Makna dari variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ sama dengan $[0/+45/+45/0/0/+45/+45/0]_s$ atau $[0/+45/+45/0/0/+45/+45/0/0/+45/+45/0/0/+45/+45/0]_s$ yang berarti komposit laminat tersebut memiliki 16 susunan layer dimulai dari layer pertama dengan arah serat 0° dilanjutkan dengan layer kedua dengan arah serat $+45^\circ$ dan seterusnya secara berurutan. Simbol (2s) menandakan bahwa variasi

arah serat tersebut digandakan dan simetris. Sehingga hasilnya terdapat 4 *layer* dengan arah serat yang digandakan dan simetris dengan total semua *layer* yaitu 16 *layer*. Sebagai contoh variasi arah serat lain yaitu $[0/+45/90/-45]_2s$ yang maknanya sama dengan $[0/+45/90/-45/0/+45/90/-45]_s$ atau $[0/+45/90/-45/0/+45/90/-45/-45/90/+45/0/-45/90/+45/0]$ dan jika dihitung maka terdapat 16 *layer* dengan orientasi arah serat. Pada ANSYS *Composite PrepPost* atau disingkat ACP (*Pre*) orientasi arah serat tersebut dapat di *setting* setiap *layer* nya pada bagian *Modelling Ply Properties* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.

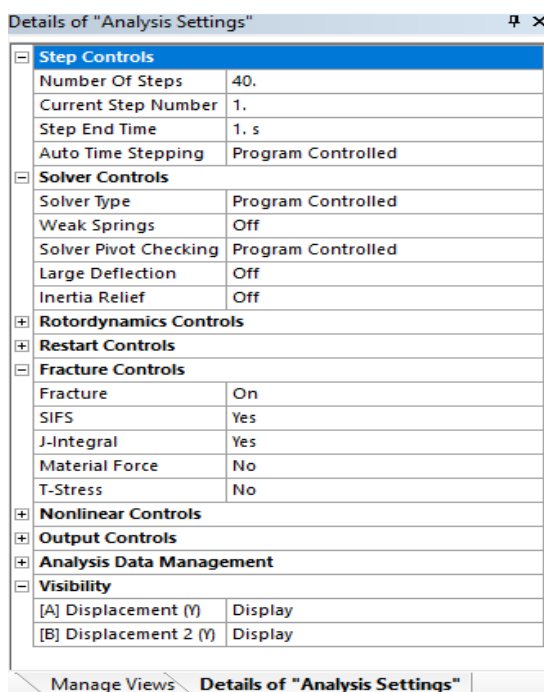


Gambar 3.8 Pengaturan *Modelling Ply Properties* dan orientasi arah serat

Setelah semuanya telah tersusun dan diatur sesuai dengan kondisi batasan masalah yang telah ditentukan, ANSYS ACP (*Pre*) dapat di-*update* untuk kemudian dilanjutkan pada modul selanjutnya, yakni ANSYS *Static Structural*, dimana proses simulasi dan kalkulasi akan dilakukan di modul ini.

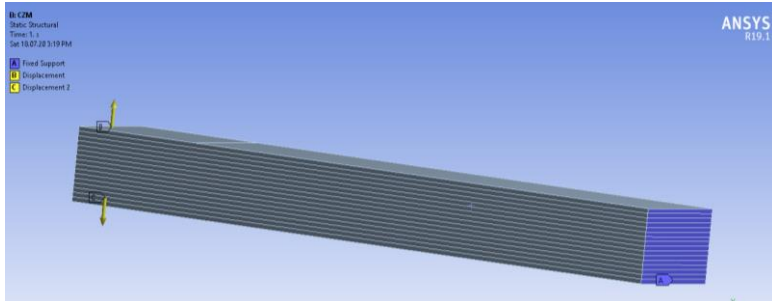
5. Menyusun *Analysis Settings*

Analysis settings merupakan pengaturan yang digunakan untuk memonitoring dan menjagasimulasi sesuai dengan kondisi aslinya. Untuk pengaturan ini, semua metode harus disamakan untuk mencapai tujuan penelitian seperti pada Gambar 3.9 berikut.



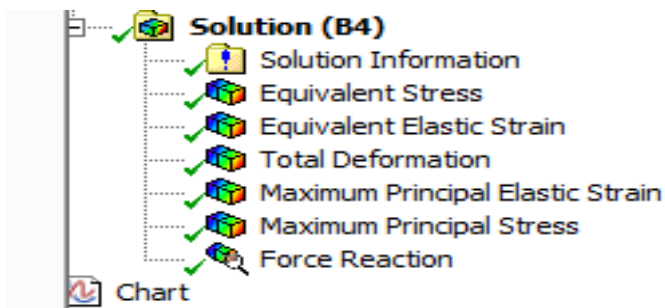
Gambar 3.9 Pengaturan pada *Analysis Setting*

6. Melakukan pengaturan *Boundary Conditions*
Sama halnya dengan *Analysis settings*, *Boundary conditions* seperti *Fixed Support* dan orientasi arah *displacement* diperlukan untuk menjaga simulasi agar bisa terkontrol dengan baik seperti pada Gambar 3.10. Hal ini juga nantinya akan berpengaruh signifikan terhadap hasil simulasi.



Gambar 3.10 Pengaturan *Boundary Conditions*

7. Pengaturan *Solution*
Tahapan terakhir untuk mendapatkan data yang diinginkan seperti data tegangan, regangan, *critical force* dan lainnya maka perlu di input beberapa *tool* contohnya seperti pada Gambar 3.11. Setelah proses *solving*, didapatkan data hasil simulasi dalam bentuk tabular data seperti pada Gambar 3.12.



Gambar 3.11 Contoh *Solution*

Outline		Tabular Data			
		Force Reaction (X) [N]	Force Reaction (Y) [N]	Force Reaction (Z) [N]	Force Reaction (Total) [N]
1	0.2	0.	43.794	0.	43.794
2	0.4	0.	87.583	0.	87.583
3	0.7	0.	153.25	0.	153.25
4	1.	0.	218.88	0.	218.88
5	1.2	0.	218.88	0.	218.88
6	1.4	0.	218.88	0.	218.88
7	1.7	0.	218.88	0.	218.88
8	2.	0.	218.88	0.	218.88
9	2.2	0.	218.88	0.	218.88
10	2.4	0.	218.88	0.	218.88
11	2.7	0.	218.88	0.	218.88
12	3.	0.	218.88	0.	218.88
13	3.2	0.	218.88	0.	218.88
14	3.4	0.	218.88	0.	218.88
15	3.7	0.	218.88	0.	218.88
16	4.	0.	218.88	0.	218.88
17	4.2	0.	218.88	0.	218.88
18	4.4	0.	218.88	0.	218.88
19	4.7	0.	218.88	0.	218.88
20	5.	0.	218.88	0.	218.88
21	5.2	0.	218.88	0.	218.88
22	5.4	0.	218.88	0.	218.88
23	5.7	0.	218.88	0.	218.88
24	6.	0.	218.88	0.	218.88
25	6.2	0.	218.88	0.	218.88
26	6.4	0.	218.88	0.	218.88
27	6.7	0.	218.88	0.	218.88
28	7.	0.	218.88	0.	218.88

Details of "Force Reaction"

Graphics **Tabular Data** Graph

Gambar 3.12 Contoh *Tabular Data*

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Analisis numerik menggunakan metode elemen hingga untuk mengamati peristiwa delaminasi pada material komposit serat karbon dengan variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/+90/-45/0]_2s$ telah dilakukan. Spesifikasi dari material dapat ditinjau pada Tabel 3.1. Dilakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga, yakni ANSYS *Workbench Mechanical R19.1*. Pada simulasi ini digunakan 2 metode pendekatan numerik yang berbeda, yaitu metode *Cohesive Zone Method (CZM)* dan *Virtual Crack Closure (VCC)*.

4.1 Analisis Data

Pada penelitian ini, setelah dilakukan simulasi terhadap 2 variasi arah serat dan 2 variabel metode delaminasi, selanjutnya dilakukan analisis data untuk menentukan, mempelajari, mengidentifikasi dan mengevaluasi setiap hasil simulasi delaminasi untuk setiap variasi dengan masing-masing metode.

4.1.1 Analisis Mesh Sensitivity

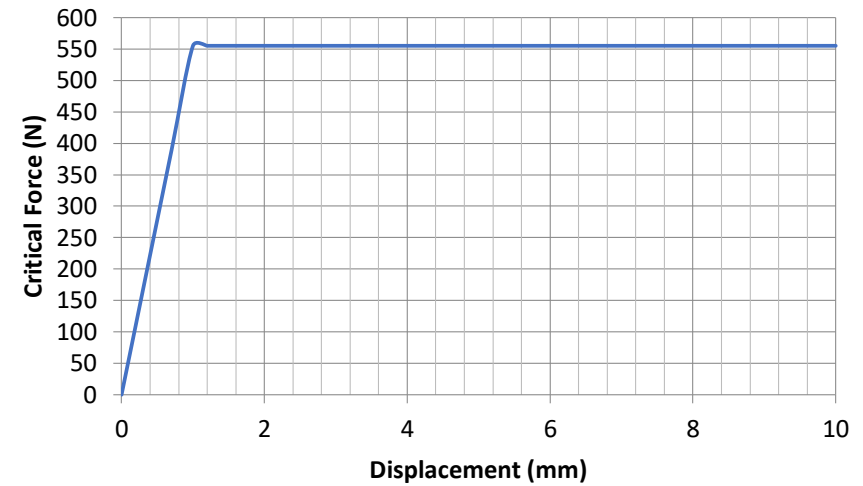
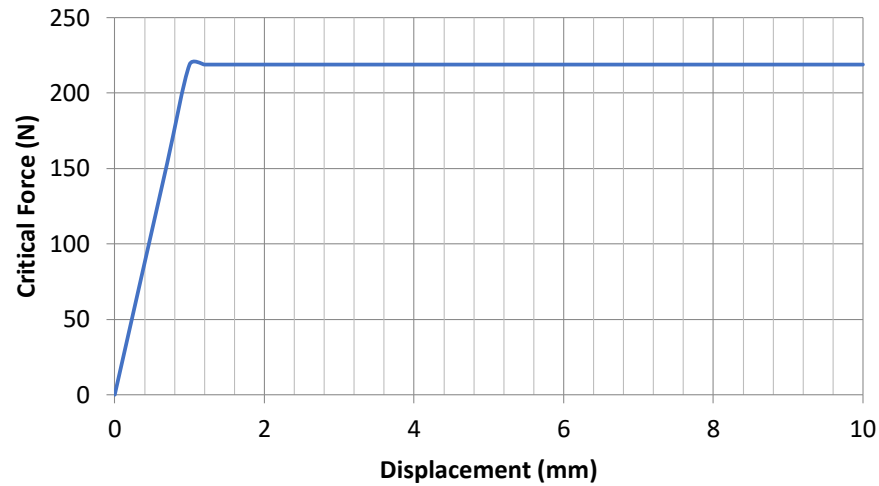
Pada penelitian ini dilakukan *mesh sensitivity analysis* atau analisis sensitivitas *mesh* yaitu pengujian keakuratan penggunaan ukuran elemen dimana setelah itu dilanjutkan dengan penarikan kesimpulan dan melakukan simulasi. Pengujian *mesh sensitivity* didasarkan pada besaran nilai *critical force*. Jumlah elemen sangat bergantung pada ukuran elemen yang digunakan pada *mesh*. Semakin banyak jumlah elemen maka semakin kecil ukuran elemen *mesh* dari sebuah geometri dan semakin baik pula tingkat *meshing* dari geometri tersebut. Pada penelitian delaminasi komposit ini, digunakan tiga variasi jumlah elemen yaitu sebesar 3750, 7500 dan 15000 elemen. Pada hasil simulasi didapatkan hasil *critical force* dari masing-masing variasi arah serat dengan metode CZM atau teknik VCC seperti yang tertera pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 *Mesh sensitivity analysis*

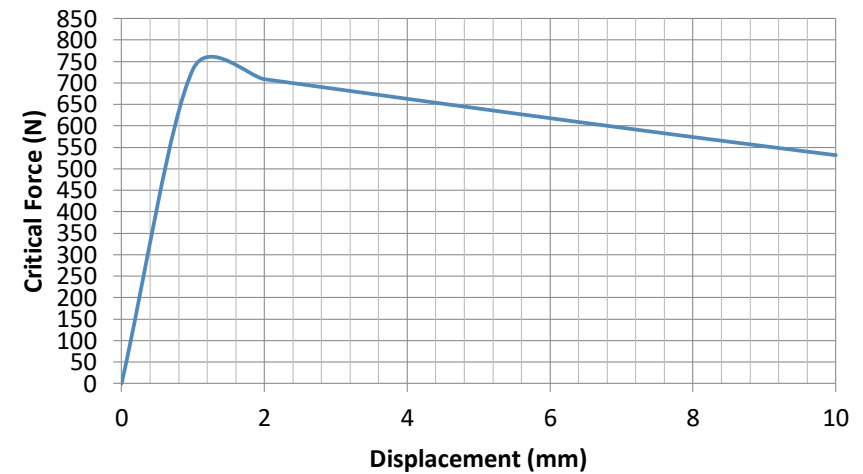
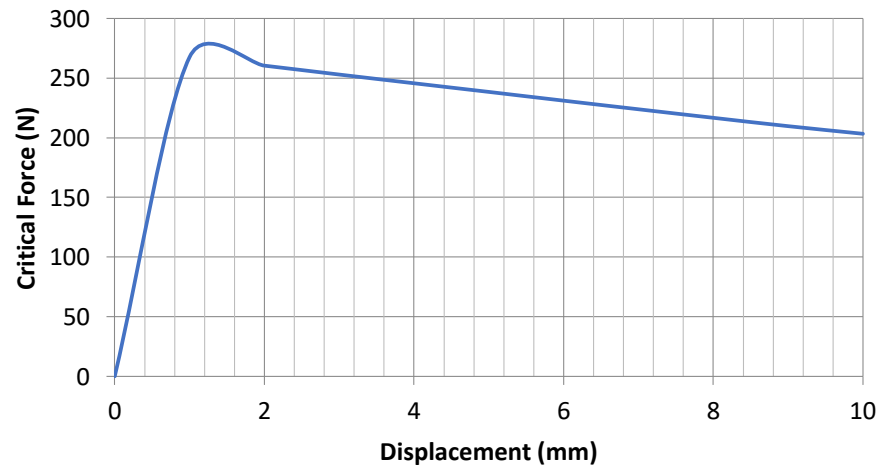
Variasi	Metode	Jumlah Elemen	Ukuran Elemen	Nilai ANSYS [N]
[0/+45/+45/0]2s	CZM	3750	1 mm	218,88
		7500	0,7 mm	218,65
		15000	0,5 mm	218,52
	VCC	3750	1 mm	267,61
		7500	0,7 mm	267,25
		15000	0,5 mm	267,25
[0/+45/+90/-45]2s	CZM	3750	1 mm	555,19
		7500	0,7 mm	554,9
		15000	0,5 mm	554,73
	VCC	3750	1 mm	731,43
		7500	0,7 mm	730,67
		15000	0,5 mm	730,17

4.1.2 Analisis Kurva *Critical Force-Displacement*

Respons dari kurva *critical force-displacement* telah dimodelkan dengan beberapa pendekatan. Dapat diperhatikan bahwa kurva *critical force* dan *displacement* yang didapatkan pada metode CZM dan teknik VCC berbeda. Dari hasil simulasi didapatkan hasil nilai *critical force* yang berbeda di berbagai *displacement*. Ketika nilai *critical force* dan *displacement* mencapai nilai maksimum, maka akan terjadi *onset* delaminasi (Waseem, 2014). Pada penelitian ini, melalui pendekatan dengan metode CZM didapatkan hasil *critical force* yang konvergen setelah mengalami *onset* delaminasi. Sementara itu melalui metode teknik VCC didapatkan hasil *critical force* dengan tren menurun setelah terjadinya *onset* delaminasi.

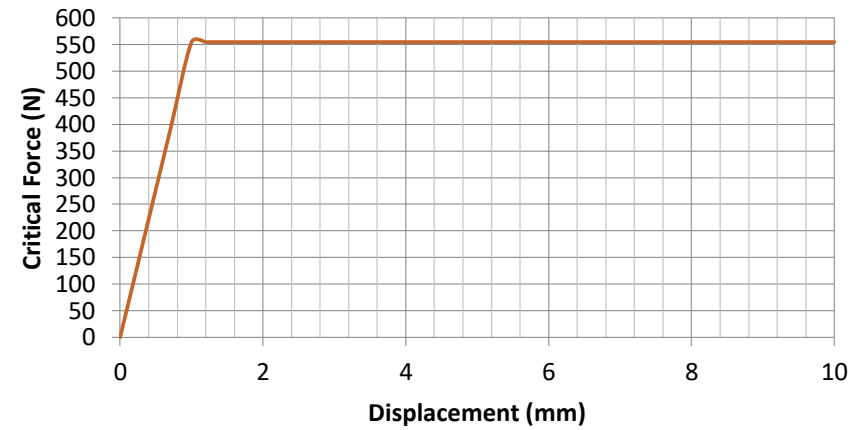
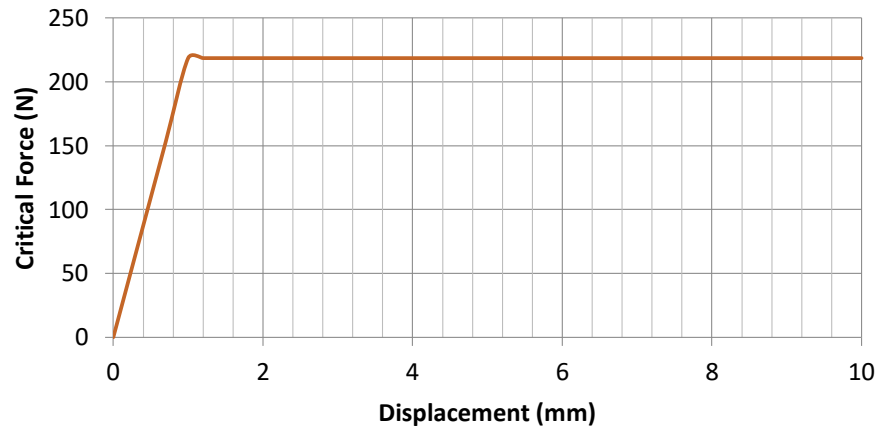


(a)

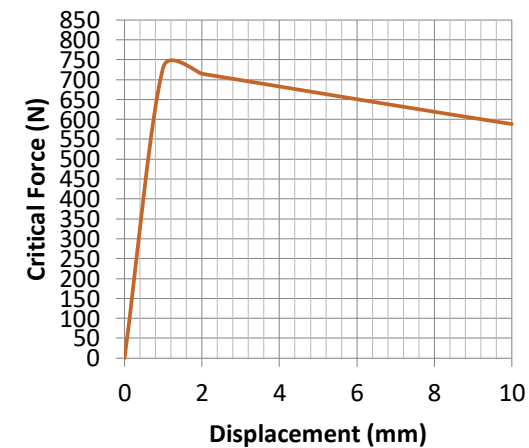
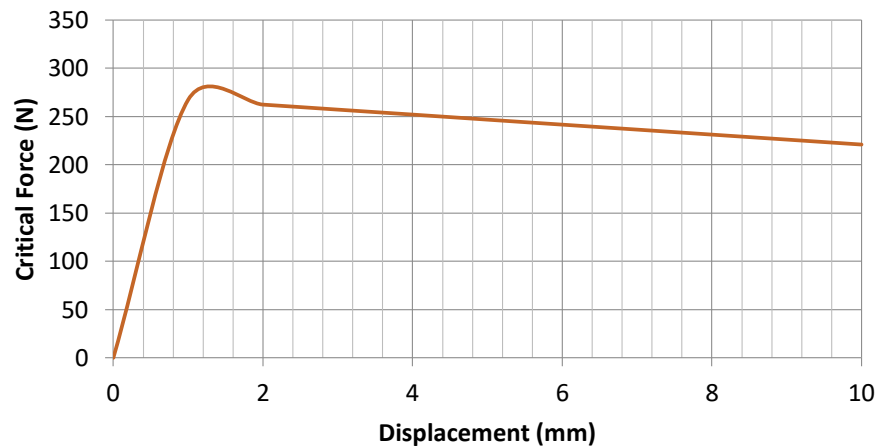


(b)

Gambar 4.1 Perbandingan *mesh* dari variasi [0/+45/+45/0]2s (kiri) dan [0/+45/90/-45]2s (kanan) pada nilai F_{crit} terhadap *displacement* dengan jumlah elemen 3750 menggunakan metode (a) CZM (b) VCC

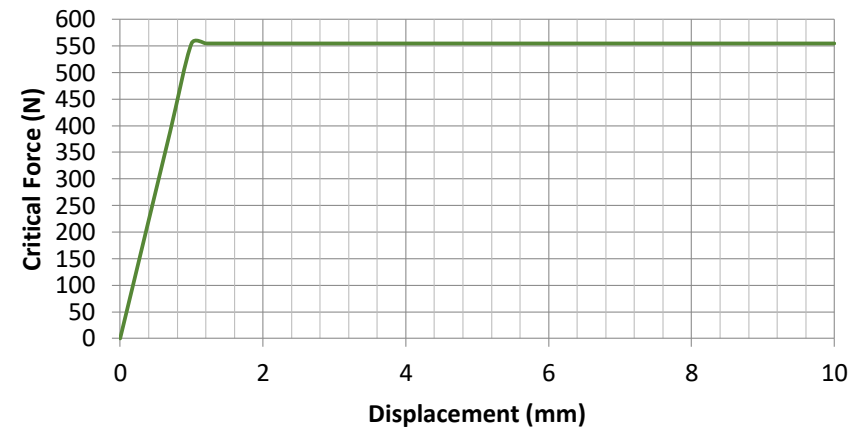
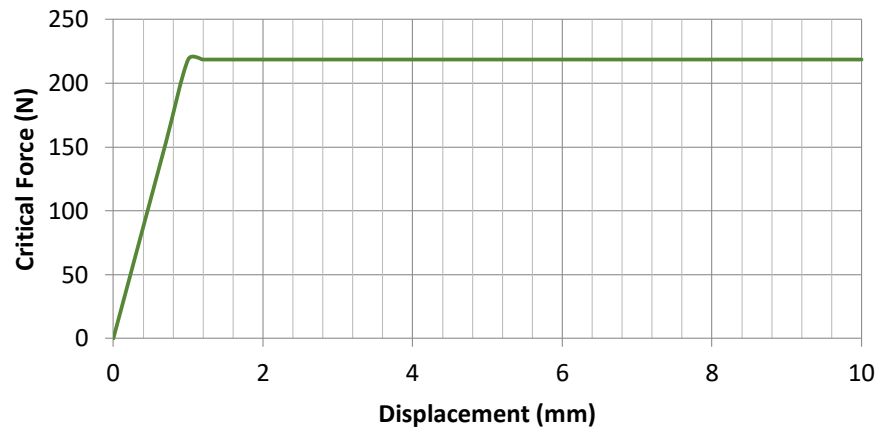


(a)

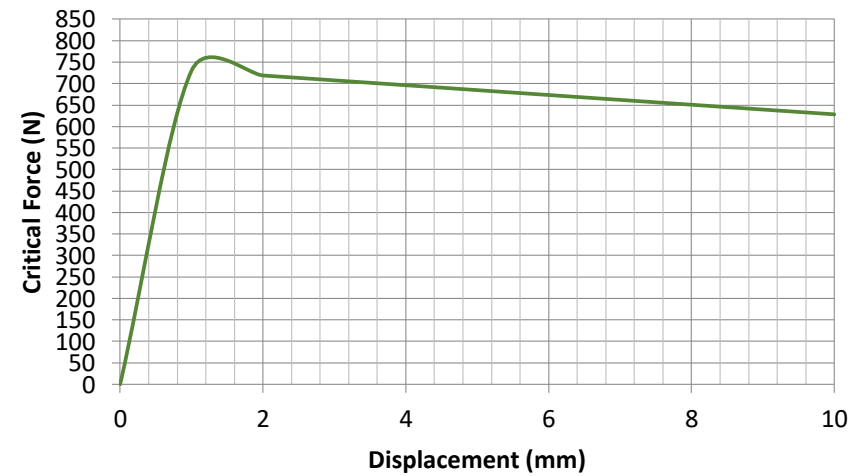
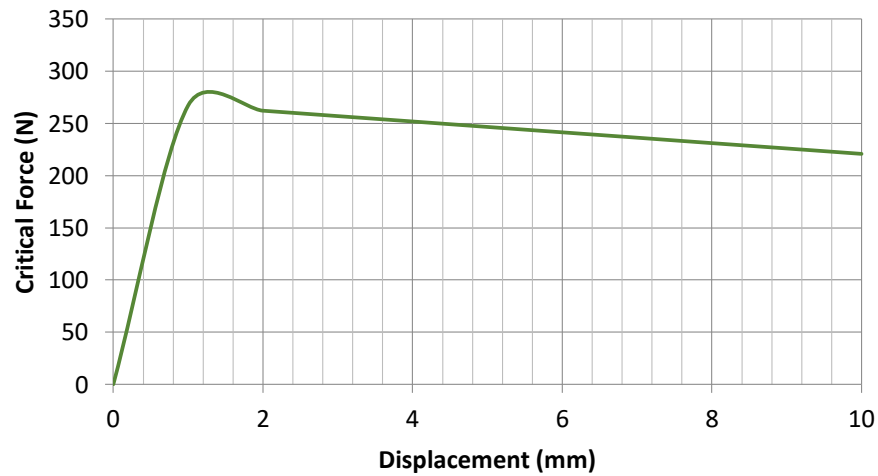


(b)

Gambar 4.2 Perbandingan *mesh* dari variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ (kiri) dan $[0/+45/90/-45]_2s$ (kanan) pada nilai F_{cri} terhadap *displacement* dengan jumlah elemen 7500 menggunakan metode (a) CZM (b) VCC



(a)



(b)

Gambar 4.3 Perbandingan *mesh* dari variasi [0/+45/+45/0]2s (kiri) dan [0/+45/90/-45]2s (kanan) pada nilai F_{crit} terhadap *displacement* dengan jumlah elemen 15000 menggunakan metode (a) CZM (b) VCC

Pada Gambar 4.1 diperlihatkan pada grafik dengan metode CZM dan teknik VCC dengan variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ mempunyai bentuk yang menyerupai grafik pada Gambar 4.2 dan 4.3 dengan metode dan variasi yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *critical force* yang dihasilkan oleh simulasi ANSYS memiliki nilai yang hampir serupa. Perlu dicatat bahwa setiap jumlah elemen memiliki nilai *critical force* maksimum yang berbeda-beda.

Pada variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ didapatkan nilai maksimum *critical force* dengan metode CZM untuk 3750 elemen sebesar 218,88 N sementara untuk 7500 elemen sebesar 218,65 N dan 15000 elemen sebesar 218,52 N. Pada variasi arah serat yang sama juga didapatkan nilai maksimum *critical force* dengan teknik VCC pada 3750 elemen sebesar 267,61 N sementara untuk 7500 elemen sebesar 267,25 N dan 15000 elemen sebesar 267,25 N. Sementara pada variasi $[0/+45/+90/-45]_2s$ didapatkan nilai maksimum *critical force* dengan metode CZM pada 3750 elemen sebesar 555,19 N sementara untuk 7500 elemen sebesar 554,9 N dan 15000 elemen sebesar 554,73 N. Pada variasi arah serat yang sama juga didapatkan nilai maksimum *critical force* dengan teknik VCC pada 3750 elemen sebesar 731,43 N sementara untuk 7500 elemen sebesar 730,67 dan 15000 elemen sebesar 730,17 N.

Selisih yang didapatkan antara nilai maksimum *critical force* dari variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/+90/-45]_2s$ sangat lah jauh. Sebagai contoh pada variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ dengan metode CZM untuk 15000 elemen yaitu 218,52 N dan dengan metode yang sama pada variasi $[0/+45/+90/-45]_2s$ yaitu 554,73 N. Sementara itu dengan teknik VCC untuk variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ yaitu 267,25 N dan dengan metode yang sama pada variasi $[0/+45/+90/-45]_2s$ yaitu 730,17 N. Perbedaan *critical force* yang sangat jelas tersebut menandakan pentingnya susunan variasi arah serat. Dibutuhkan suatu variasi arah serat dengan orientasi arah tertentu untuk meningkatkan sifat mekanik secara lokal dan global seperti yang dijelaskan pada sub bab 2.5.

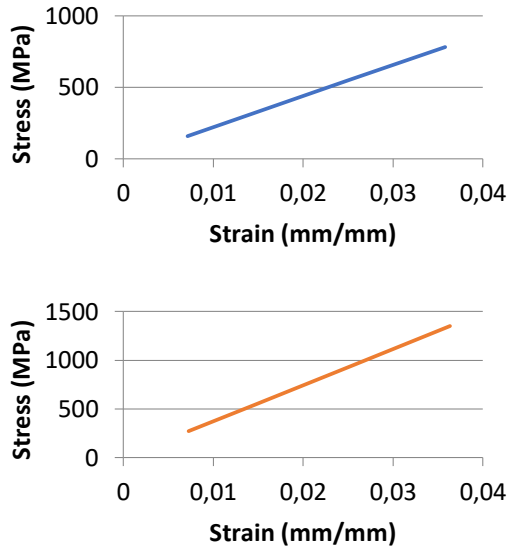
Pada grafik diatas diperlihatkan bahwa terdapat perbedaan pada variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/+90/-45]_2s$ terhadap garis tren dengan menggunakan teknik VCC. Ketika dalam tahap inisiasi pertumbuhan retak (*crack propagation initiation*) garis tren naik sampai terjadinya *critical failure* dan setelah itu garis tren turun dengan gradien yang berbeda-beda. Sementara itu pada grafik hasil simulasi dengan metode CZM pada variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/+90/-45]_2s$ diperlihatkan bahwa pada garis tren naik saat tahap inisiasi pertumbuhan retak (*crack propagation initiation*) sampai terjadinya *critical failure* garis tren turun dan konvergen serta tidak ditemukannya perbedaan pada gradien garis tersebut. Meskipun demikian perlu dicatat bahwa nilai minimum *critical force* yang dihasilkan pada pada variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/+90/-45]_2s$ memiliki nilai yang berbeda-beda.

Didapatkan nilai minimum *critical force* pada variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ dengan metode CZM untuk 3750 elemen sebesar 43,794 N sementara untuk 7500 elemen sebesar 43,749 N dan 15000 elemen sebesar 43,722 N. Pada variasi arah serat yang sama juga didapatkan nilai minimum *critical force* dengan teknik VCC pada 3750 elemen sebesar 203,33 N sementara untuk 7500 elemen sebesar 220,88 N dan 15000 elemen sebesar 220,88 N. Sementara pada variasi variasi $[0/+45/+90/-45]_2s$ didapatkan nilai minimum *critical force* dengan metode CZM pada 3750 elemen sebesar 111,27 N sementara untuk 7500 elemen sebesar 111,21 N dan 15000 elemen sebesar 111,18 N. Pada variasi arah serat yang sama juga didapatkan nilai minimum *critical force* dengan teknik VCC pada 3750 elemen sebesar 531,73 N sementara untuk 7500 elemen sebesar 588,16 N dan 15000 elemen sebesar 628,44 N.

Dari hasil analisis numerik tersebut, diketahui bahwa jumlah elemen 3750, 7500 dan 15000 memiliki hasil *critical force* yang tidak jauh berbeda pada variasi arah serat dan metode yang sama. Maka dari itu, hal tersebut menjadi pembandingan nilai *critical force* dengan variasi arah serat dan metode yang berbeda.

4.2 Analisis Karakterisasi Delaminasi Melalui Kurva *Stress-Strain* dan *Stress-Strain Distribution*

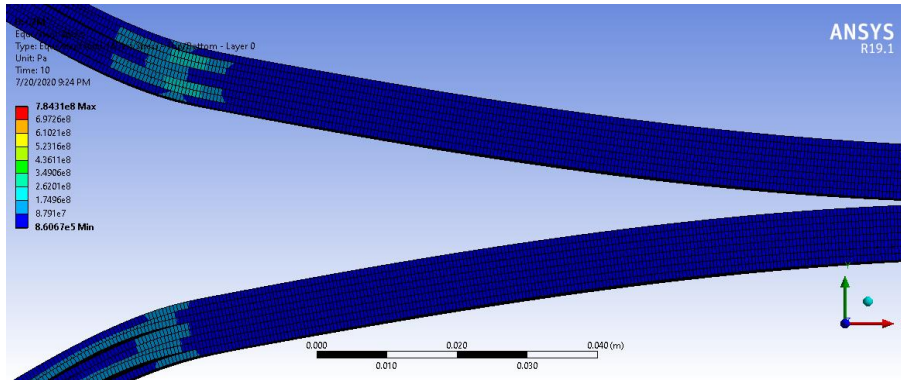
Seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya bahwa terdapat beberapa data yang diexport dari hasil simulasi ANSYS. Antara lain yaitu kurva *stress-strain* dan *stress-strain distribution*.



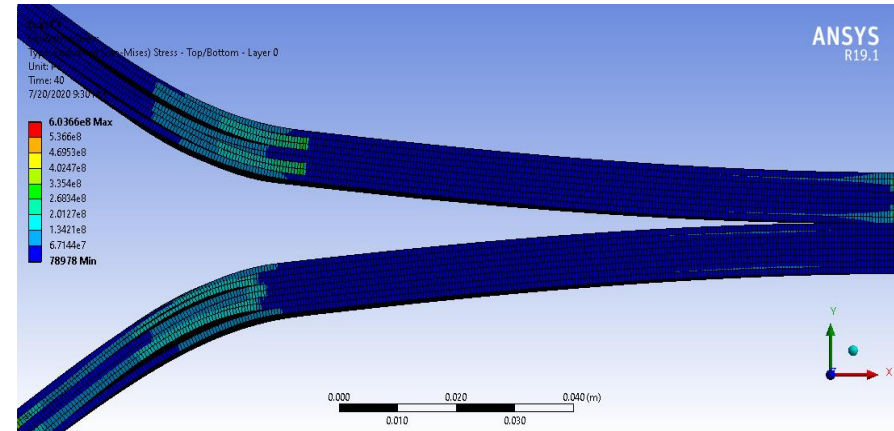
Gambar 4.4 Kurva *stress-strain* pada variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ (atas) dan $[0/+45/+90/-45]_2s$ (bawah)

Pada Gambar 4.4 kurva *stress-strain* dari hasil simulasi tampak bahwa nilai maksimum dari $[0/+45/+90/-45]_2s$ lebih besar dari nilai maksimum $[0/+45/+45/0]_2s$ hal ini mengacu kepada data *Equivalent Stress (Von Mises Stress)* dan *Equivalent Elastic Strain (Von Mises Strain)*. Pada dasarnya kurva *stress-strain* dihasilkan oleh material yang dikenai beban, kemudian mengalami peregangan sebagai akibat dari respon terhadap beban yang diterima, dan asli dari sifat mekanika material.

4.2.1 Pengaruh Metode terhadap *Stress-Strain Distribution*
Variasi [0/+45/+45/0]2s :

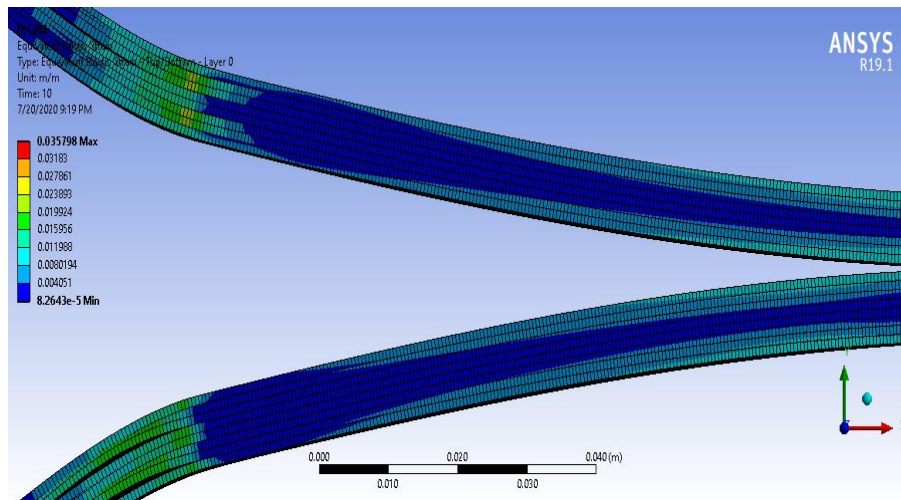


(a)

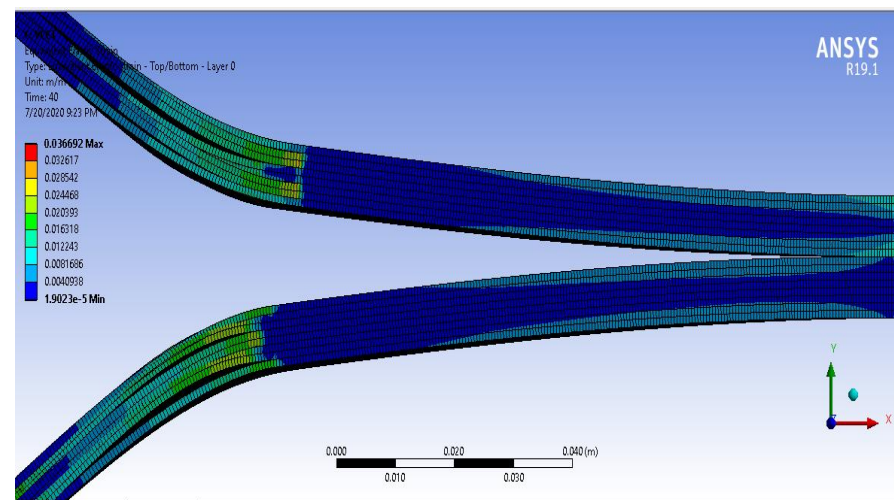


(b)

Gambar 4.5 Hasil *Equivalent Stress* pada Metode (a) CZM dan (b) VCC



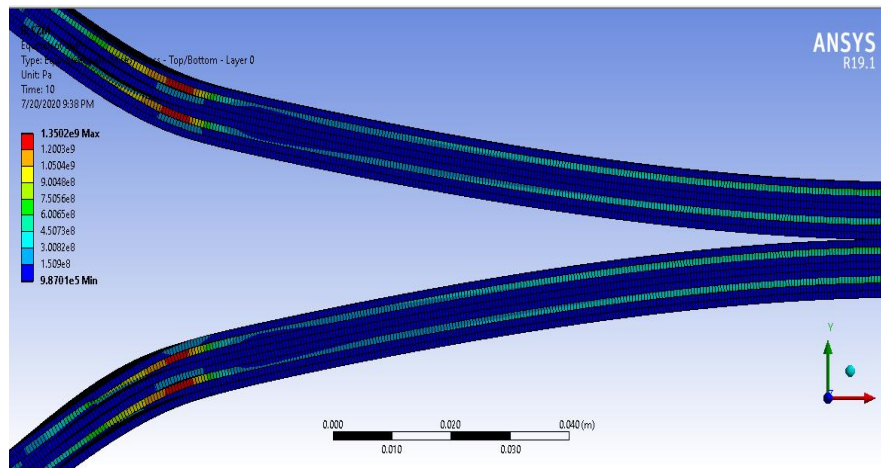
(a)



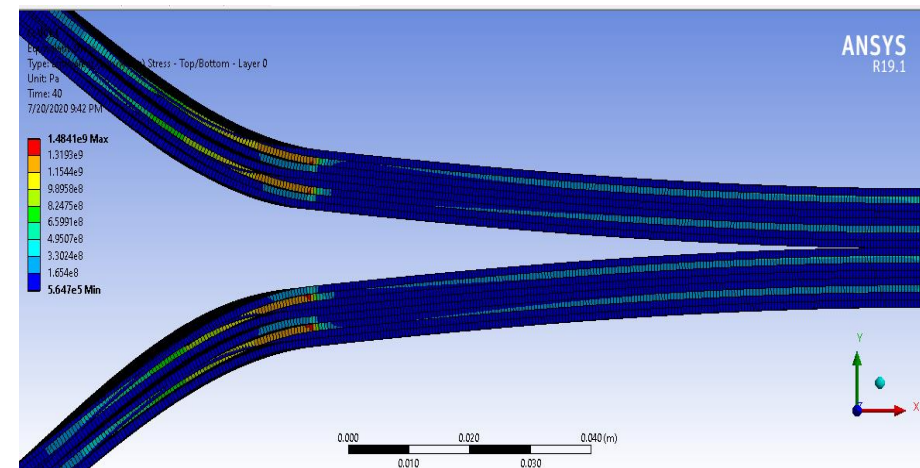
(b)

Gambar 4.6 Hasil *Equivalent Elastic Strain* dari metode (a) CZM dan (b) VCC

Variasi [0/+45/+90/-45]2s :

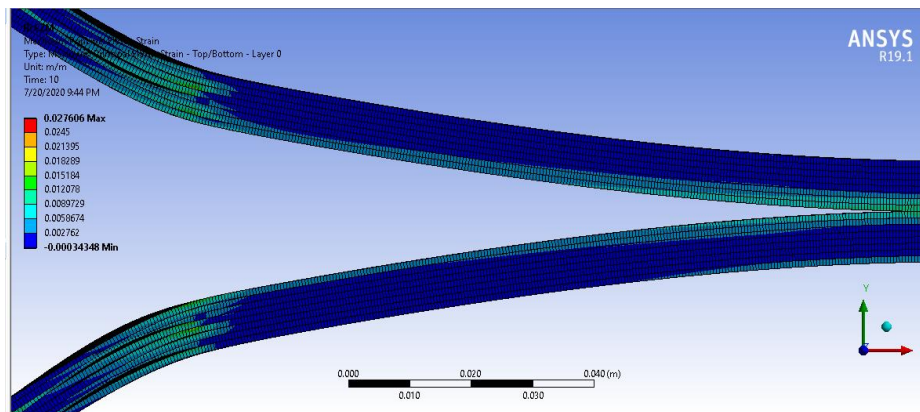


(a)

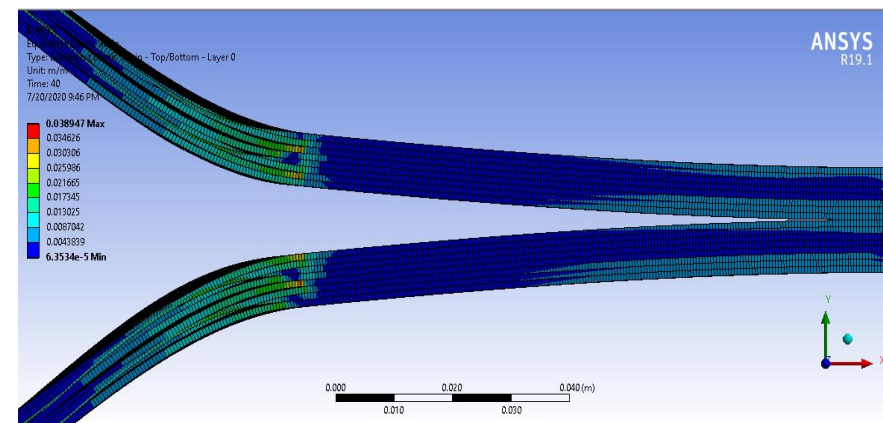


(b)

Gambar 4.7 Hasil *Equivalent Stress* pada Metode (a) CZM dan (b) VCC



(a)



(b)

Gambar 4.8 Hasil *Equivalent Elastic Strain* dari metode (a) CZM dan (b) VCC

Delaminasi pada material komposit serat karbon dengan variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/+90/-45]_2s$ menggunakan metode CZM dan teknik VCC didapatkan hasil distribusi tegangan. Dari kedua metode tersebut didapatkan hasil yang berbeda. Dengan menggunakan *Equivalent Stress* dapat diamati distribusi dari tegangan.

Pada variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ dengan metode CZM didapatkan tegangan tertinggi pada nilai 783,41 MPa sementara dengan teknik VCC tegangan tertinggi sebesar 891,54 MPa. Dengan kedua metode tersebut didapatkan distribusi tegangan yang terkonsentrasi pada *crack tip* serta memiliki arah rambatan yang lurus dengan sumbu X seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Sementara itu, didapatkan hasil yang berbeda pada variasi $[0/+45/+90/-45]_2s$ dimana dengan metode CZM tegangan tertinggi pada nilai 1350,3 MPa dan dengan teknik VCC tegangan tertinggi pada nilai 1840,4 MPa. Hasil distribusi tegangan menunjukkan tegangan tertinggi pada *crack tip* dan menjalar sepanjang atas dan bawah permukaan dari *interface* yang terdelaminasi. Distribusi tegangan yang dihasilkan juga merata dan simetris serta memiliki arah rambatan lurus dengan sumbu X seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.

Sementara itu, distribusi regangan yang diamati melalui *Equivalent Elastic Strain* pada variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/+90/-45]_2s$ menggunakan metode CZM dan teknik VCC didapatkan hasil yang berbeda. Hasil yang didapat ditunjukkan melalui kontur warna yang terdistribusi sebagai regangan.

Pada variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dengan metode CZM dan teknik VCC didapatkan distribusi regangan tertinggi terdapat pada *crack tip* dengan kontur warna yang sangat mencolok dibandingkan dengan yang lainnya. Selain itu terdapat distribusi regangan juga menjalar sepanjang atas dan bawah permukaan dari *interface* yang terdelaminasi dengan arah rambatan lurus dengan sumbu X seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Selanjutnya pada variasi arah serat $[0/+45/+90/-$

45/12s dengan menggunakan metode CZM dan teknik VCC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 menunjukkan tegangan tertinggi tetap pada *crack tip* dan tidak terdistribusinya regangan secara merata.

Hal ini sesuai dengan teori yang ditunjukkan pada sub bab 2.8.1 ketika pinggir dari permisahan antar permukaan berkurang, permukaan virtual atau permukaan kohesif, terpisah satu sama lain dan mendefinisikan sebagai formasi dari retak makroskopis pada lokasi. Keadaan tegangan antara permukaan kohesif berkembang sesuai dengan hukum kohesif. Sementara itu, dengan teknik VCC juga menunjukkan kesesuaian dengan teori pada sub bab 2.8.2 dimana suatu bidang tegangan atau bidang regangan pada sebuah komponen elastis dengan *node* yang diletakkan pada bawah patahan dan atas permukaan terikat bersama dengan batasan internal yang dapat dilepaskan secara progresif dengan tujuan mensimulasi tumbuhnya retakan. Kemudian energi yang hilang oleh virtual dengan ekstensi retak sama dengan kemampuan yang akan dilakukan untuk menutup retakan dengan kekuatan yang bertindak pada permukaan retak baru sebelum retak ekstensi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil mengenai analisis simulasi delaminasi beserta pembahasannya telah dibahas secara rinci pada bab sebelumnya. Dari hasil pembahasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil simulasi numerik delaminasi material komposit serat karbon dengan variasi arah serat $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/90/-45]_2s$ menggunakan metode CZM dan VCC dibandingkan dengan pendekatan teoritis didapatkan bahwa *critical force* dari variasi arah serat $[0/+45/90/-45]_2s$ jauh lebih besar daripada $[0/+45/+45/0]_2s$ pada variasi jumlah elemen 3750, 7500 dan 15000.
2. Karakteristik delaminasi dengan variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ dan $[0/+45/+90/-45]_2s$ telah diobservasi dengan dua metode berbeda, hasilnya didapat bahwa dengan metode CZM dan teknik VCC masing-masing variasi arah serat memiliki karakteristik yang berbeda pada beberapa parameter, yakni kurva *stress-strain*, distribusi tegangan dan distribusi regangan.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya mengenai analisis numerik proses delaminasi yang terjadi pada material komposit, saran-saran berikut dapat menjadi pertimbangan untuk memperdalam hasil dan mengetahui lebih jauh tentang simulasi delaminasi pada ANSYS Workbench, antara lain:

1. Perlu dilakukan penelitian *single-method* dengan beberapa parameter untuk menentukan kualitas dari hasil simulasi.
2. Beberapa parameter tersebut antara lain penentuan ukuran elemen, *analysis settings*, *boundary conditions* dan lainnya.
3. Respon yang ditarik dapat diperluas seperti analisis *stress failure*, *stress intensity factor*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abrate, S. 2015. **Cohesive Zone Models and Impact Damage Predictions for Composite Structures**.USA: Springer.
- Barbero, Ever J. 2014. **Finite Element Analysis of Composite Materials Uisng ANSYS®**. Florida: Taylor & Francis Group, LLC.
- Campbell, F. 2010. **Structural Composite Materials**. United States of America: ASM International
- Chawla, Krishan K. 2013. **Composites Materials Science and Engineering Third Edition**. New York: Springer.
- Chetan, H.C. 2018. **Finite Element Modelling for Mode-I Fracture Behaviour of CFRP**. America: American Institute of Physics.
- Ding, Wei. 2000. **Delamination Analysis of Composite Laminates**. Canada: University of Toronto.
- Dixit, Uday S. 2017. **Finite Element Metod: An Introduction**. India:Departemen of Mechanical, Indian Institute of Technology.
- Huang, Xiaosong. 2009. **Fabrication and Properties of Carbon Fibers**. USA: Chemical Sciences & Materials Systems Laboratory.
- Hudisteanu, I. 2019. **Interlaminar Failure Investigations on Delamination Growth of Composite Laminates**. Romania: Technical University of Iasi.
- Jiang, Haodan. 2010. **Cohesive Zone Model for Carbon Nanotube Adhesive Simulation and Fracture/Fatigue Crack Growth**.AS:University of Akron.
- Jin, Fan Long. 2015. **Synthesis and Application of EpoxyResins**. China: Jilin Institute of Chemical Technology.
- Jokinen, Jarno. 2017. **Crack Onset Analysis for the CZM-VCC Method**. Tampere: Tampere University of Technology.
- Jones,R.M. 2000. **Mechanics of Composite Materials**. Blacksburg, Virginia: Taylor & Francis Group.

-
- Pastuszak, Przemyslaw Daniel. 2013. **Application of Composite Materials in Modern Construction**. Poland: Cracow University of Technology
- Purimpat, Sathumnuwong. 2013. **Effect of Fiber Angle Orientation on a Laminated Composite Single-Lap Adhesive Joint**. Florida: Taylor & Francis Group.
- Rarani, Mohammad H. 2019. **Finite Element Modelling Strategies for 2D and 3D delamination propagation in composite DCB specimens using VCCT, CZM and XFEM Approaches**. Iran: University of Isfahan.
- Reddy, J.N. 2000. **Theory and Analysis of Laminated Composite Plates**. Texas: A&M University.
- Sulistijono. 2012. **Mekanika Material Komposit, Edisi Pertama**. Surabaya: ITS Press.
- Valvo, Paolo Sebastiano. 2011. **Toward a Revised Virtual Crack Closure Technique**. Italy: University of Pisa.
- Waseem H. S. 2014. **Finite Element Modelling for Delamination Analysis of Double Cantilever Beam Specimen**. Bangalore, India: SSRG International Journal of Mechanical Engineering.
- Xiao, Xin. 2018. **The Delamination Study of Composites with XFEM/VCCT**. China: School of Astronautics, Beihang University.
- Yang, Qingda. 2004. **Modelling Damage Evolution in Laminated Composites Using Cohesive Zone Models**. USA: Rockwell Scientific Company.
-
-

LAMPIRAN

Lampiran 1: Data Kurva *Stress-Strain* Hasil Pengujian Simulasi Delaminasi

Data F_{crit} terhadap Perubahan *Displacement* pada Variasi $[0/+45/+45/0]_2s$ dengan Metode CZM

3750 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0.2	43.794
0.4	87.583
0.7	153.25
1	218.88
1.2	218.88
1.4	218.88
1.7	218.88
2	218.88
2.2	218.88
2.4	218.88
2.7	218.88
3	218.88
3.2	218.88
3.4	218.88
3.7	218.88
4	218.88
4.2	218.88
4.4	218.88
4.7	218.88
5	218.88
5.2	218.88
5.4	218.88
5.7	218.88
6	218.88
6.2	218.88
6.4	218.88
6.7	218.88
7	218.88
7.2	218.88
7.4	218.88
7.7	218.88
8	218.88
8.2	218.88
8.4	218.88
8.7	218.88
9	218.88
9.2	218.88
9.4	218.88
9.7	218.88
10	218.88

7500 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0.2	43.749
0.4	87.493
0.7	153.09
1	218.65
1.2	218.65
1.4	218.65
1.7	218.65
2	218.65
2.2	218.65
2.4	218.65
2.7	218.65
3	218.65
3.2	218.65
3.4	218.65
3.7	218.65
4	218.65
4.2	218.65
4.4	218.65
4.7	218.65
5	218.65
5.2	218.65
5.4	218.65
5.7	218.65
6	218.65
6.2	218.65
6.4	218.65
6.7	218.65
7	218.65
7.2	218.65
7.4	218.65
7.7	218.65
8	218.65
8.2	218.65
8.4	218.65
8.7	218.65
9	218.65
9.2	218.65
9.4	218.65
9.7	218.65
10	218.65

15000 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0.2	43.722
0.4	87.44
0.7	153.
1.	218.52
1.2	218.52
1.4	218.52
1.7	218.52
2.	218.52
2.2	218.52
2.4	218.52
2.7	218.52
3.	218.52
3.2	218.52
3.4	218.52
3.7	218.52
4.	218.52
4.2	218.52
4.4	218.52
4.7	218.52
5.	218.52
5.2	218.52
5.4	218.52
5.7	218.52
6.	218.52
6.2	218.52
6.4	218.52
6.7	218.52
7.	218.52
7.2	218.52
7.4	218.52
7.7	218.52
8.	218.52
8.2	218.52
8.4	218.52
8.7	218.52
9.	218.52
9.2	218.52
9.4	218.52
9.7	218.52
10.	218.52

Data F_{crit} terhadap Perubahan *Displacement* pada Variasi
[0/+45/+45/0]_{2s} dengan Metode VCCT

3750 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
1	267.61
2	260.45
3	252.98
4	245.67
5	238.42
6	231.09
7	223.88
8	216.71
9	209.73
10	203.33

7500 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
1.	267.25
2.	262.28
3.	257.07
4.	251.94
5.	246.69
6.	241.53
7.	236.39
8.	231.19
9.	226.06
10.	220.88

15000 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
1.	267.25
2.	262.28
3.	257.07
4.	251.94
5.	246.69
6.	241.53
7.	236.39
8.	231.19
9.	226.06
10.	220.88

Data *Ferit* terhadap Perubahan *Displacement* pada Variasi [0/+45/+90/-45]_{2s} dengan Metode CZM

3750 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0.2	111.27
0.4	222.48
0.7	389.06
1.	555.19
1.2	555.19
1.4	555.19
1.7	555.19
2.	555.19
2.2	555.19
2.4	555.19
2.7	555.19
3.	555.19
3.2	555.19
3.4	555.19
3.7	555.19
4.	555.19
4.2	555.19
4.4	555.19
4.7	555.19
5.	555.19
5.2	555.19
5.4	555.19
5.7	555.19
6.	555.19
6.2	555.19
6.4	555.19
6.7	555.19
7.	555.19
7.2	555.19
7.4	555.19
7.7	555.19
8.	555.19
8.2	555.19
8.4	555.19
8.7	555.19
9.	555.19
9.2	555.19
9.4	555.19
9.7	555.19
10.	555.19

7500 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0.2	111.21
0.4	222.36
0.7	388.86
1.	554.9
1.2	554.9
1.4	554.9
1.7	554.9
2.	554.9
2.2	554.9
2.4	554.9
2.7	554.9
3.	554.9
3.2	554.9
3.4	554.9
3.7	554.9
4.	554.9
4.2	554.9
4.4	554.9
4.7	554.9
5.	554.9
5.2	554.9
5.4	554.9
5.7	554.9
6.	554.9
6.2	554.9
6.4	554.9
6.7	554.9
7.	554.9
7.2	554.9
7.4	554.9
7.7	554.9
8.	554.9
8.2	554.9
8.4	554.9
8.7	554.9
9.	554.9
9.2	554.9
9.4	554.9
9.7	554.9
10.	554.9

15000 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0.2	111.18
0.4	222.29
0.7	388.74
1.	554.73
1.2	554.73
1.4	554.73
1.7	554.73
2.	554.73
2.2	554.73
2.4	554.73
2.7	554.73
3.	554.73
3.2	554.73
3.4	554.73
3.7	554.73
4.	554.73
4.2	554.73
4.4	554.73
4.7	554.73
5.	554.73
5.2	554.73
5.4	554.73
5.7	554.73
6.	554.73
6.2	554.73
6.4	554.73
6.7	554.73
7.	554.73
7.2	554.73
7.4	554.73
7.7	554.73
8.	554.73
8.2	554.73
8.4	554.73
8.7	554.73
9.	554.73
9.2	554.73
9.4	554.73
9.7	554.73
10.	554.73

Data F_{crit} terhadap Perubahan *Displacement* pada Variasi
[0/+45/+90/-45]_{2s} dengan Metode VCCT

3750 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
1.	731.43
2.	708.61
3.	685.74
4.	662.93
5.	640.27
6.	617.83
7.	595.7
8.	573.93
9.	552.6
10.	531.73

7500 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
1.	730.67
2.	714.67
3.	698.69
4.	682.64
5.	666.61
6.	650.67
7.	634.82
8.	619.1
9.	603.56
10.	588.16

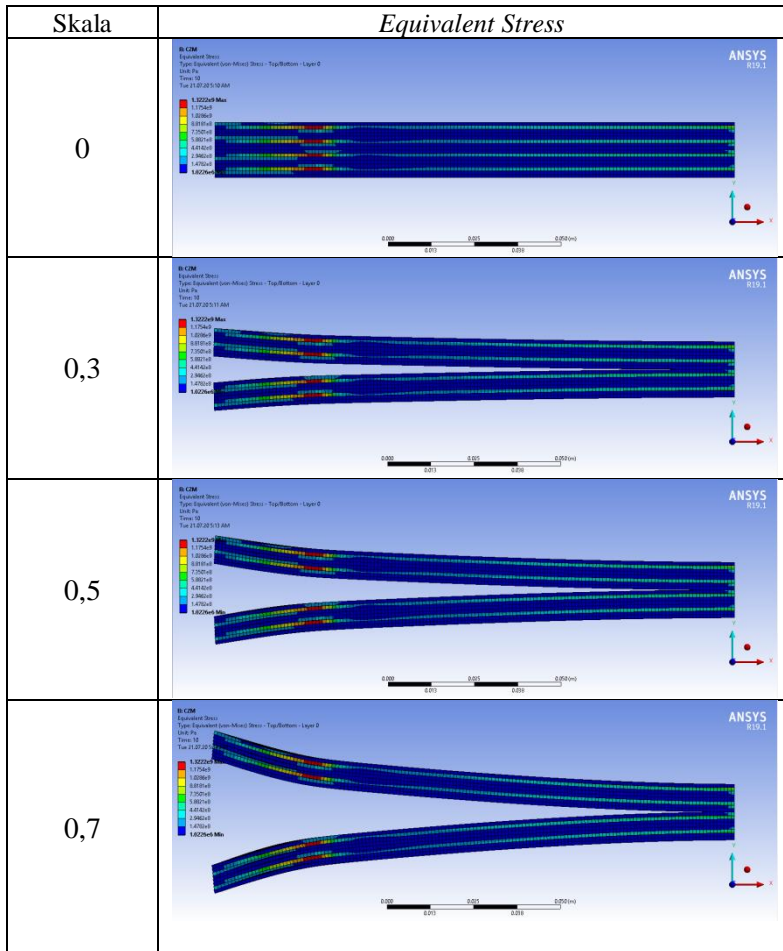
15000 elemen	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
1.	730.17
2.	718.93
3.	707.6
4.	696.22
5.	684.85
6.	673.48
7.	662.15
8.	650.85
9.	639.61
10.	628.44

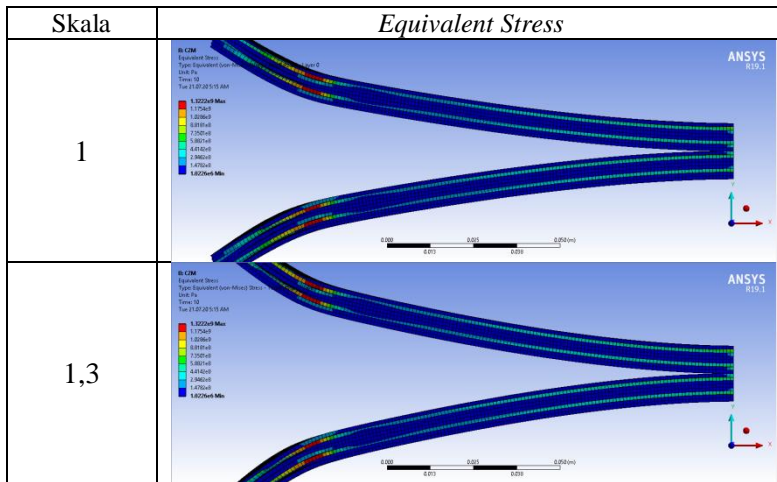
Data Kurva *Stress-Strain* untuk Variasi $[0/+45/+90/-45]_2s$

CZM	
Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
268.71	0.0072851
538.11	0.014567
943.46	0.025476
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358
1350.2	0.036358

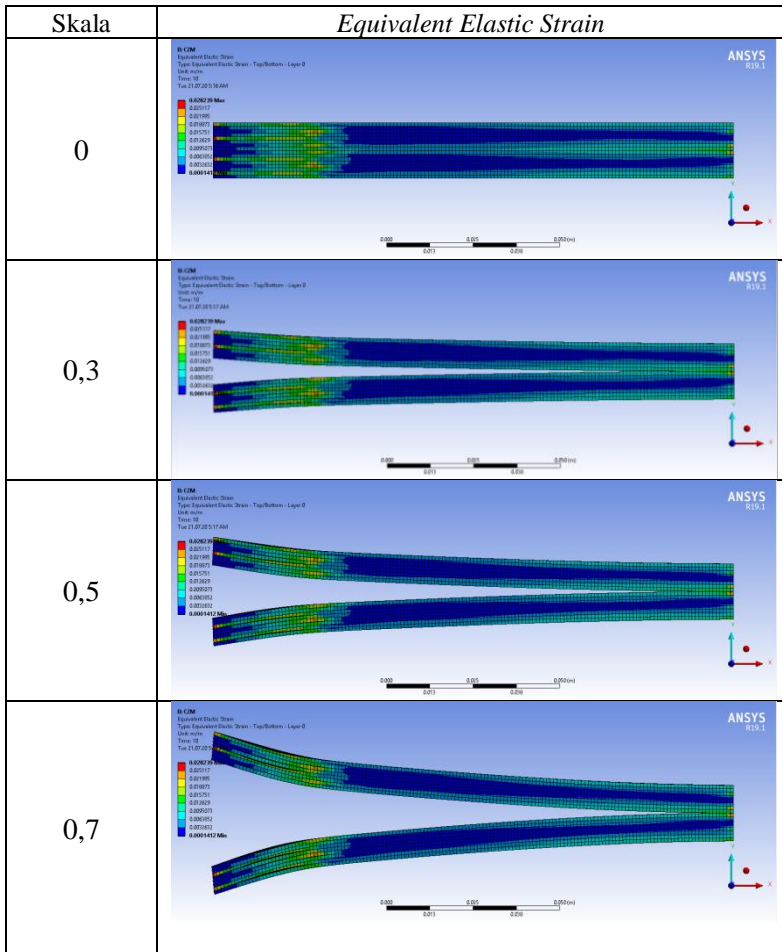
VCCT	
Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
1840.4	0.046525
1842.2	0.046817
1842.9	0.04715
1843.5	0.04721
1843.1	0.047237
1841.9	0.047264
1839.7	0.047272
1836.6	0.047243
1832.1	0.047181
1827	0.047116
1821.6	0.047003
1815.8	0.046852
1809.8	0.046683
1803.3	0.046493
1796.9	0.046272
1790.1	0.046026
1781	0.045747
1771.5	0.045441
1761.8	0.045123
1751.7	0.04477
1741.1	0.044406
1730.4	0.04401
1719.5	0.043586
1707.1	0.043131
1694.9	0.042663
1682.2	0.042191
1669	0.041713
1655.8	0.041202
1642.5	0.0407
1628.7	0.040205
1614.6	0.039734
1600.4	0.03932
1586.6	0.039619
1572.1	0.042456
1557.4	0.041822
1542.9	0.041175
1528.2	0.040543
1513.5	0.039863
1498.8	0.039217
1484.1	0.038947

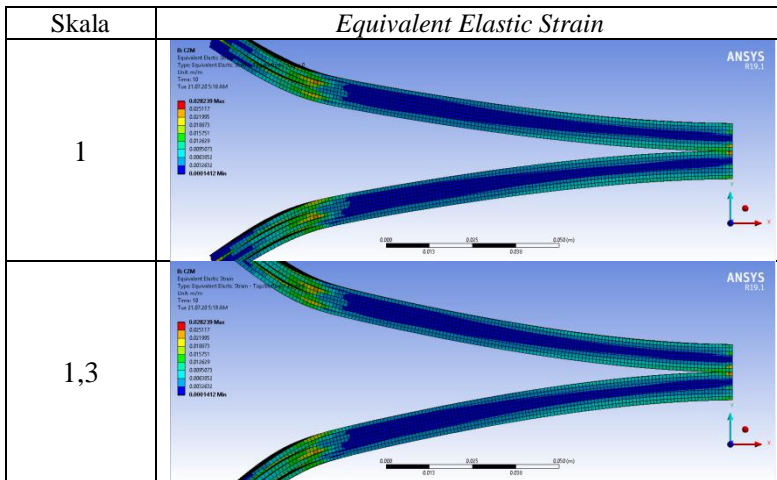
Lampiran 3. Data Distribusi Tegangan terhadap Skala Delaminasi





Lampiran 4: Data Distribusi Regangan terhadap Skala Delaminasi





UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai penutup penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberi perlindungan dan kekuatan bagi penyusun dalam melaksanakan penelitian Tugas Akhir.
2. Orang tuayang selalu mendukung serta memberikan doa selama penelitian Tugas Akhir dan penyusunan laporan.
3. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu, serta kesabaran yang luar biasa kepada penulis.
4. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir sekaligus Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI ITS yang telah membimbing, membantu, serta memberikan banyak ilmu pengetahuan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini maupun ilmu pengetahuan lain yang sangat berguna bagi penulis.
5. Teman-teman Material angkatan 2016 yang memotivasi penulis untuk menyelesaikan pengerjaan Tugas Akhir.
6. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dan membantu kelancaran proses pengerjaan Tugas Akhir.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Iqbal Bagaskoro. Penulis dilahirkan di Magelang, 22 Agustus 1998. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Pertiwi Magelang, SD Negeri Magelang 7, SMP Negeri 1 Magelang, dan SMA Negeri 3 Madiun. Penulis kemudian melanjutkan studinya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2016 dengan NRP 02511640000011.

Selama menjalankan pendidikan di kampus ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi di BSO KWU HMMT FTI-ITS sebagai Staf Divisi Usaha Mandiri pada kepengurusan 2017/2018. Penulis juga berpartisipasi aktif dalam LDJ Ash-Haabul Kahfi sebagai Staf AK Preneur pada kepengurusan 2017/2018 dan dilanjutkan menjadi Kabiro AK Preneur pada kepengurusan 2018/2019. Penulis juga tergabung dalam INDOCOR ITS SC sebagai Staf *Research and Development* pada kepengurusan 2017/2018 dan dilanjutkan sebagai Kepala Departemen *Research and Development* pada kepengurusan 2018/2019.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)