

# 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, Mas Irfan Purbawanto Hidayat, dan Hosta Ardhyana  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail:* irfan@mat-eng.its.ac.id

**Abstrak**—Perkembangan teknologi material komposit terutama di material komposit laminat sangat pesat. 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.I 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 karakteristik stress-strain hasil dari simulasi.

**Kata Kunci**—Delaminasi, Variasi Arah Serat, CZM, VCC.

## I. PENDAHULUAN

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 [1]. 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 [2].

Salah satu mode kegagalan yang paling sering diamati dalam laminasi komposit yaitu 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

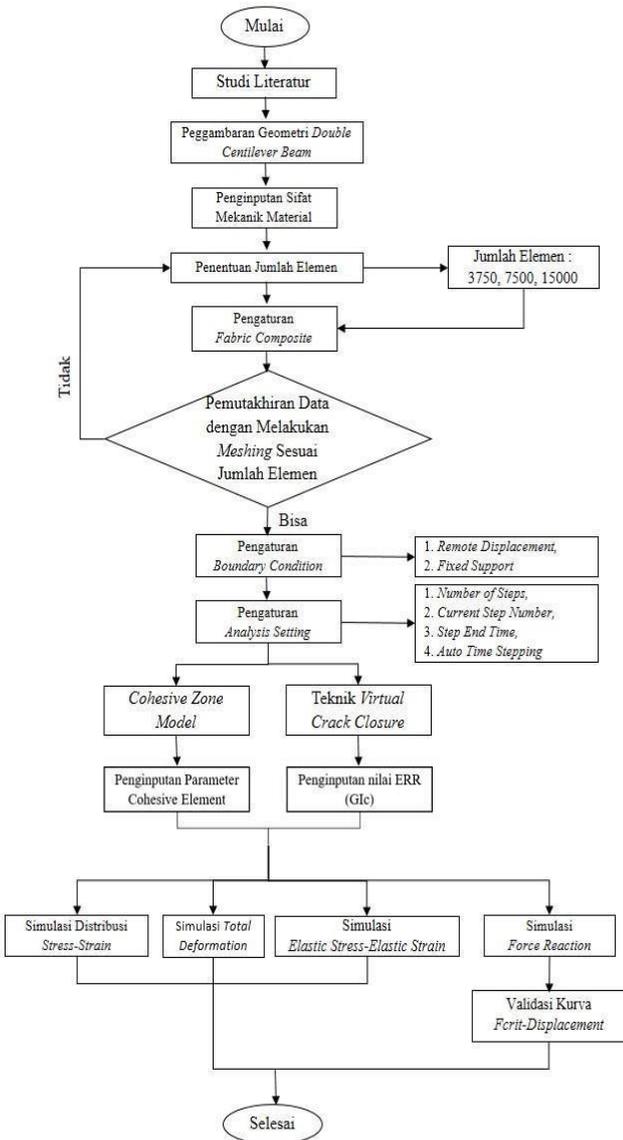
ketidakpuasan terhadap SBS dan kebutuhan untuk lebih lengkap dalam karakterisasi delaminasi. Sebagian besar metode ini berdasarkan pendekatan mekanik patahan dengan tingkat pelepasan energi regangan kritis [3]. Delaminasi dapat dianalisis dengan menggunakan model kerusakan kohesif dan mekanika fraktur. 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 [4].

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) [5].

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.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

Pada Analisa delaminasi ini, terdapat beberapa tahap yang

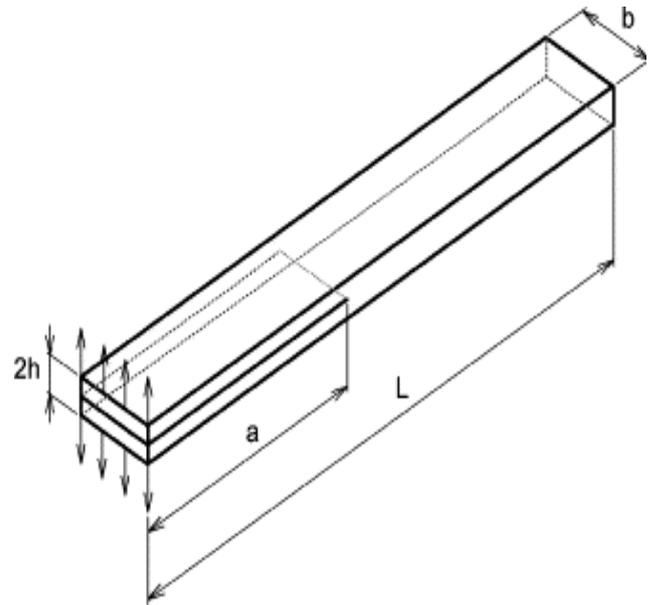


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

harus dilakukan untuk mendapatkan hasil yang sesuai. Langkah-langkah tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada penelitian simulasi delaminasi komposit laminat ini, adapun material yang digunakan yaitu *Epoxy Carbon UD* (CFRP) bertipe *Prepeg Ply*. Data spesifikasi dari material dan nilai yang digunakan pada penelitian dirincikan seperti yang tertera pada Tabel 1.

Adapun perangkat yang digunakan pada penelitian simulasi numerik delaminasi komposit yang yaitu laptop dengan spesifikasi RAM 4 GB, CPU AMD A9 7<sup>th</sup> gen, 2,4 GHz, dan Windows x10 Pro 64. Untuk perangkat lunak yang digunakan untuk menggambar geometri *double cantilever beam* dengan menggunakan ANSYS *DesignModeller R19.1* dan di *couple* dengan menggunakan ANSYS ACP (*Pre*) R19.1 pada ANSYS *Workbench R19.1*. Pembuatan geometri untuk metode CZM dan teknik VCC dilakukan pada perangkat lunak ANSYS *Design Modeller*. Desain dari geometri spesimen *double cantilever beam* (DCB) dapat dilihat pada Gambar 2 dengan metode CZM atau teknik VCC seperti yang tertera pada Tabel 2.



L (panjang) = 150 mm  
 b (lebar) = 25 mm  
 2h (tinggi) = 16 mm  
 A (Panjang initial crack) = 30 mm

Gambar 2. Geometri spesimen *double cantilever beam*.

### III. HASIL 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]<sub>2s</sub> dan [0/+45/+90/-45/0]<sub>2s</sub> telah dilakukan. Spesifikasi dari material dapat ditinjau pada Tabel 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).

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.

#### A. 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.

Tabel 1.  
Spesifikasi Material Penelitian

Material Properties	Direction	Nilai
Orthotropic Material Properties		
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
Orthotropic Stress Limit		
Tensile Properties (MPa)	X	2231
	Y	29
	Z	29
Compressive Properties (MPa)	XY	-1082
	XZ	-100
	YZ	-100
Shear Properties (MPa)	XY	60
	XZ	32
	YZ	60
Orthotropic Strain Limit		
Tensile Properties (MPa)	X	0.0167
	Y	0.0032
	Z	0.0032
Compressive Properties (MPa)	XY	-0.0108
	XZ	-0.0192
	YZ	-0.0192
Shear Properties (MPa)	XY	0.012
	XZ	0.011
	YZ	0.012
Exponential for Interface Delamination		
Maximum Normal Traction, $T_c$ (MPa)		80
Normal Separation Across the Interface, $d_1$ (mm)		0.5
Shear Separation at Maximum Shear Traction, $d_2$ (mm)		0.5
Energy Release Rate Critical Mode-I ( $\text{mJ/mm}^2$ )		0.352
Panjang = 150 mm		
Panjang initial crack = 30 mm		
Dimensi Spesimen	Tinggi = 16 mm	
	Lebar = 25 mm	
Displacement = 30 mm (Y dan -Y)		
Variasi Arah Serat 1		[0/+45/+45/0]2s
Variasi Arah Serat 2		[0/+45/90/-45]2s

Tabel 2.  
Analisis *mesh sensitivity*

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

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.

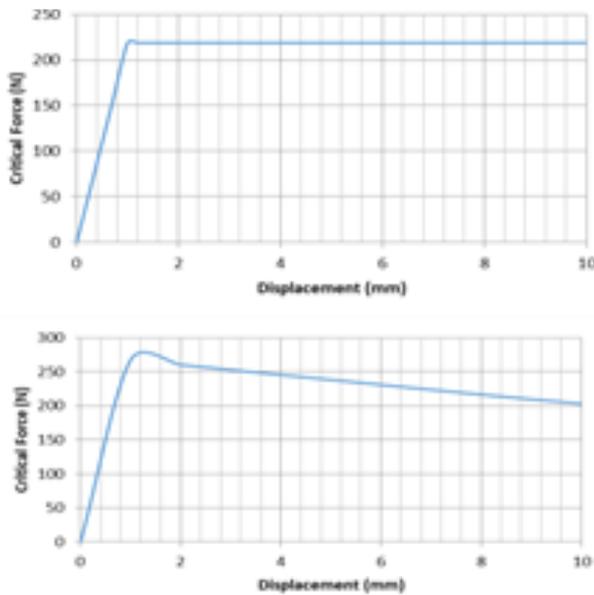
Selisih yang didapatkan antara nilai maksimum *critical force* dari variasi arah serat [0/+45/+45/0]2s dan [0/+45/+90/-45]2s sangat lah jauh. Sebagai contoh pada variasi [0/+45/+45/0]2s dengan metode CZM untuk 15000 elemen yaitu 218,52 N dan dengan metode yang sama pada variasi [0/+45/+90/-45]2s yaitu 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 [6].

Pada grafik dalam Gambar 4 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

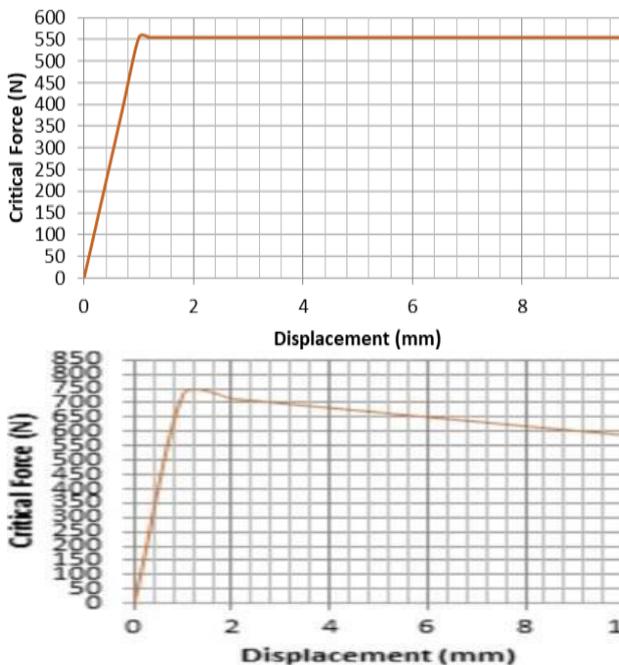
**B. Analisis Kurva Critical Force-Displacement**

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 [5]. 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.

Pada Gambar 3 diperlihatkan pada grafik dengan metode CZM dan teknik VCC dengan variasi [0/+45/+45/0]2s mempunyai bentuk yang menyerupai grafik pada Gambar 4 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.



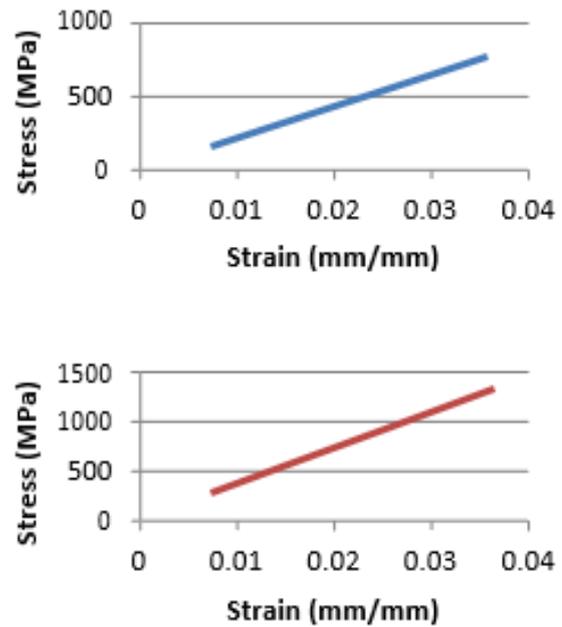
Gambar 3. Grafik *mesh* variasi [0/+45/+45/0]2s dengan jumlah elemen 3750, 7500 dan 15000 menggunakan metode CZM (atas) dan VCC (bawah).



Gambar 4. Grafik *mesh* pada variasi [0/+45/+90/-45]2s dengan jumlah elemen 3750, 7500 dan 15000 menggunakan metode CZM (atas) dan VCC (bawah).

[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



Gambar 5. Kurva *Stress—Strain* pada variasi [0/+45/+45/0]2s (atas) dan [0/+45/+90/-45]2s (bawah).

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.

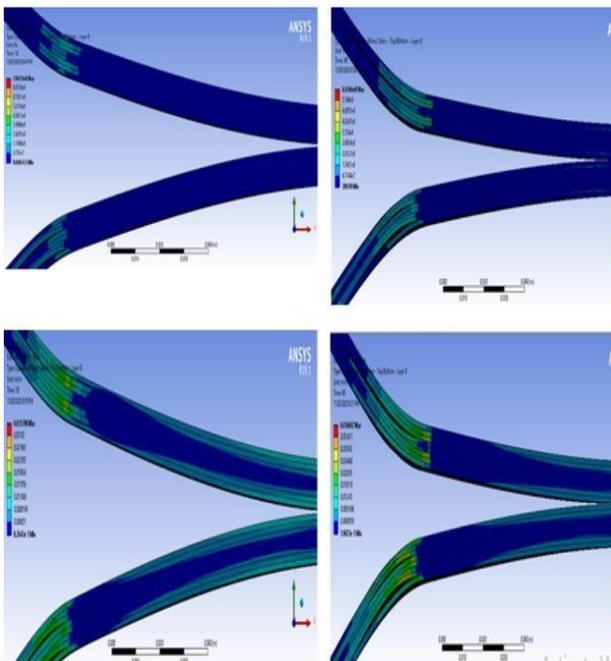
### C. Analisis Karakterisasi Delaminasi Melalui Kurva *Stress—Strain* dan *Stress—Strain Distribution*

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

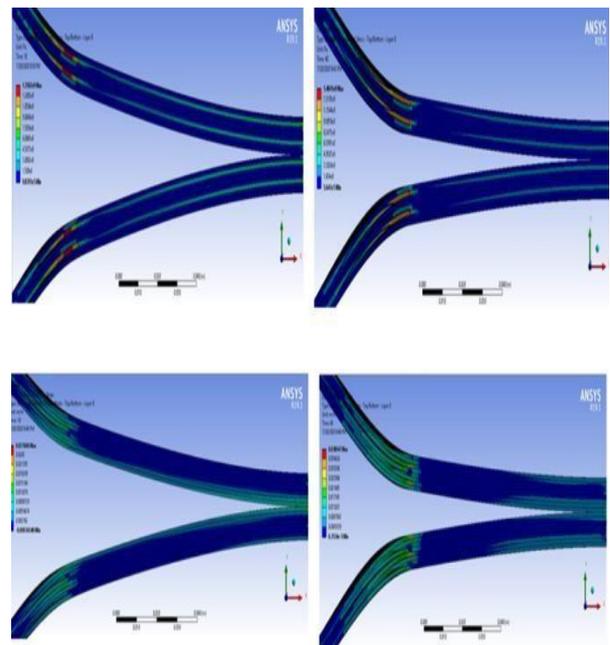
Pada Gambar 5 kurva *stress-strain* dari hasil simulasi tampak bahwa nilai maksimum dari [0/+45/+90/-45]2s lebih besar dari nilai maksimum [0/+45/+45/0]2s hal ini mengacu kepada data *Equivalent Stress (Von Mises Stress)* dan *Equivalent Elastic Strain (Von Mises Strain)*. Pada dasarnya kurva *stress-strain* dihasilkan oleh material yang dikenai beban, kemudian mengalami peregangan sebagai akibat dari respon terhadap beban yang diterima, dan asli dari sifat mekanika material.

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 6.



Gambar 6. Hasil *Equivalent Stress* dan *Equivalent Elastic Strain* pada variasi [0/+45/+45/0]2s dengan menggunakan metode CZM (kiri) dan VCC (kanan).



Gambar 7. Hasil *Equivalent Stress* dan *Equivalent Elastic Strain* pada variasi [0/+45/+90/-45]2s dengan menggunakan metode CZM (kiri) dan VCC (kanan).

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 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 seperti yang ditunjukkan pada gambar 6. Selain itu terdapat distribusi regangan juga menjalar sepanjang atas dan bawah permukaan dari *interface* yang terdelaminasi dengan arah rambatan lurus dengan sumbu X. Selanjutnya pada variasi arah serat [0/+45/+90/-45]2s dengan menggunakan metode CZM dan teknik VCC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 menunjukkan tegangan tertinggi tetap pada *crack tip* dan tidak terdistribusinya regangan secara merata.

Hal ini sesuai dengan teori 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 [7]. Sementara itu, dengan teknik VCC juga menunjukkan kesesuaian dengan teori pada 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 [7].

#### IV. 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.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. K. Chawla, *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*. CRC press, 1998.
- [3] W. Ding and others, *Delamination analysis of composite laminates*. University of Toronto, 2000.
- [4] E. J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Ansys®*, no. November. CRC Press, 2013.
- [5] H. S. Mohammed Waseem and N. Kiran Kumar, "Finite element modeling for delamination analysis of double cantilever beam specimen," *SSRG Int. J. Mech. Engg.*, vol. 1, no. 5, pp. p27–p33, 2014.

- [6] S. Purimpat, R. Jérôme, and A. Shahram, "Effect of fiber angle orientation on a laminated composite single-lap adhesive joint," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 22, no. 3, pp. 139–149, 2013.
- [7] H. Jiang, "Cohesive zone model for carbon nanotube adhesive simulation and fracture/fatigue crack growth," University of Akron, 2010.