

Simulasi Delaminasi pada Komposit *Glass Fiber-reinforced Polymer* (GFRP) dan *Carbon Fiber-reinforced Polymer* Menggunakan Metode *Cohesive Zone Model* (CZM) dan *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT)

Dimas Bagus Setiawan, Mas Irfan Purbawanto Hidayat, dan Widyastuti
Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: irfan@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Komposit digunakan untuk pengganti logam, dengan mempertimbangkan kekuatan yang tidak berbeda jauh dengan logam. *Glass fiber-reinforced polymer* (GFRP) dan *carbon fiber-reinforced polymer* (CFRP) merupakan dua komposit yang saat ini banyak digunakan. Namun pada penggunaannya komposit dapat mengalami kegagalan. Salah satu kegagalan material komposit adalah delaminasi, yakni lepasnya laminat-laminat antar lapisan (*layer*) material komposit. Pada penelitian ini, telah dilakukan perbandingan hasil simulasi delaminasi dengan tujuan mencari metode terbaik pada 2 metode berbeda yakni, *Cohesive Zone Model* (CZM), dan *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT) pada dua material berbeda yakni, *carbon fiber-reinforced polymer* (CFRP) dan *glass fiber-reinforced polymer* (GFRP). Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS *Workbench Mechanical*, dimana terlebih dahulu dilakukan analisa mesh sensitivity untuk menentukan ukuran elemen paling optimal, dimana didapat ukuran 0.4 mm merupakan yang paling optimal. Setelah itu dilakukan analisa karakterisasi delaminasi dengan mempelajari kurva *stress-strain* dan distribusi tegangan-regangan. Dari analisa tersebut, dengan menggunakan parameter, didapat VCCT merupakan metode terbaik karena sesuai dengan teori, memiliki nilai *margin error* yang rendah, serta tidak memerlukan adanya preparasi delaminasi.

Kata Kunci—Delaminasi, *Glass Fiber-reinforced Polymer* (GFRP), *Carbon Fiber-reinforced Polymer* (CFRP), *Cohesive Zone Model* (CZM), *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT).

I. PENDAHULUAN

MATERIAL komposit saat ini banyak digunakan untuk *substitute metal materials*, dengan mempertimbangkan harga yang jauh lebih ekonomis, namun memiliki kekuatan dan sifat yang tidak berbeda jauh dengan logam. *Glass fiber-reinforced polymer* (GFRP) dan *carbon fiber-reinforced polymer* (CFRP) merupakan dua material komposit yang saat ini umum dan banyak digunakan secara global. Namun pada penggunaannya, dua jenis material komposit umum mengalami deformasi, bahkan mengalami kegagalan material. Salah satu kegagalan material komposit adalah delaminasi, yakni lepasnya atau robeknya laminat-laminat antar lapisan (*layer*) material komposit. Delaminasi terjadi ketika penguat antar lapisan laminat mengalami beban geser yang melampaui sifat mekanik material komposit.

Fenomena delaminasi dapat dianalisis secara numerik. Dengan bantuan *software* pemodelan, akan dibuat *artificial delamination* dengan geometri yang sederhana dan dengan

simulasi elemen hingga akan lebih mudah untuk dilakukan [1]. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *cohesive zone method*. *Cohesive zone models* (CZMs) yaitu metode berbasis metode elemen hingga / *finite element method* (FEM) berdasarkan model dimana terdapat area antarmuka (*interface*) diantara dua layer dan dimodelkan dengan *cohesive zone element* [2].

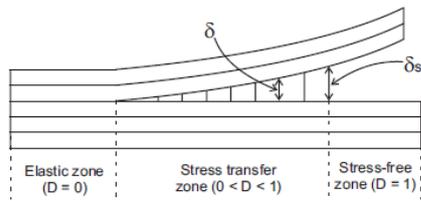
Oleh karenanya, untuk mendapatkan perambatan retak delaminasi pada material komposit, diperlukan metode numerik yang tepat dengan variabel dan parameter yang efektif untuk mendapatkan metode numerik dengan hasil yang sangat akurat. Dalam penelitian ini, akan dilakukan analisis numerik terhadap perambatan retak delaminasi pada material komposit serat kaca (GFRP) dan serat karbon (CFRP), dengan membandingkan karakteristik dan nilai acuan untuk setiap metode VCCT dan CZM, serta melakukan validasi hasil numerik dengan eksperimen yang telah dilakukan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Material Komposit

Komposit didefinisikan sebagai suatu material yang terdiri dari dua komponen atau lebih yang memiliki sifat atau struktur yang berbeda yang dicampur secara fisik menjadi satu membentuk ikatan mekanik yang dengan struktur homogen secara makroskopik dan heterogen secara mikroskopik. Material campuran tersebut akan menghasilkan material yang baru yang memiliki sifat unggul dari material pembentuknya. Dengan penggabungan dua atau lebih material yang berbeda, maka dapat diperbaiki dan dikembangkan sifat-sifat mekanik dan fisik dari material-material tersebut diantaranya adalah: kekuatan, kekakuan, ketahanan korosi, ketahanan gesek, konduktivitas termal, insulasi listrik, insulasi panas, ketahanan fatik, dan lain-lain [3].

Pada dasarnya, kita dapat mempertimbangkan komposit sebagai bahan apa saja yang merupakan kombinasi dari dua atau lebih konstituen yang berbeda. Definisi ini akan mencakup batu bata, beton, kayu, tulang, serta komposit sintesis modern seperti plastik yang diperkuat serat (FRP). Perkembangan komposit dalam 50 tahun terakhir telah berhasil menurunkan kuantitas massa tanpa mengurangi performa dan abilitas dari komposit. Bahan-bahan seperti itu kadang-kadang disebut sebagai *high-performance*



Gambar 1. Model zona kohesif.

composites, dan sering kali terdiri dari serat karbon dan resin epoksi [4].

1) Serat Karbon

Karbon adalah elemen yang sangat ringan dengan kerapatan sama dengan 2.268 g/cm³. Karbon dapat ada dalam berbagai bentuk kristal. Bentuk karbon paling terkenal adalah struktur intan kovalen di mana atom karbon disusun dalam konfigurasi tiga dimensi dengan sedikit fleksibilitas struktural. Bentuk karbon lainnya adalah *Buckminster Fullerene* (atau bola *Bucky*), dengan komposisi molekul C₆₀ atau C₇₀. Satu juga dapat memiliki nanotube karbon, yang tidak lain adalah versi *Buckyballs* [5].

2) Serat Kaca

Serat kaca adalah nama generik seperti serat karbon atau baja atau aluminium. Sama seperti komposisi berbeda dari baja atau paduan aluminium tersedia, ada banyak komposisi kimia yang berbeda dari serat kaca yang tersedia secara komersial. Serat gelas yang umum adalah berbasis silika (~50-60% SiO₂) dan mengandung sejumlah oksida lain seperti kalsium, boron, natrium, aluminium, dan besi, misalnya.

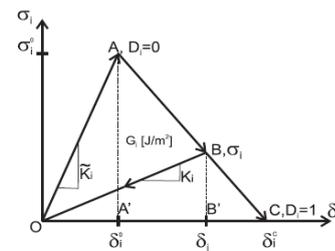
B. Metode Cohesive Zone (CZM)

Metode zona kohesif (CZM) didasarkan pada asumsi bahwa kapasitas pemindahan tegangan antara dua wajah yang terpisah dari delaminasi tidak hilang sepenuhnya pada saat inisiasi kerusakan, tetapi lebih merupakan peristiwa progresif yang diatur oleh pengurangan progresif dari antarmuka antara antarmuka antara antarmuka. dua wajah yang terpisah (Gambar 1) [6]. Antarmuka antara dua kemungkinan wajah yang terpisah dari bahan yang dilaminasi dimodelkan dengan perilaku material yang kohesif, yaitu, metode zona kohesif (CZM).

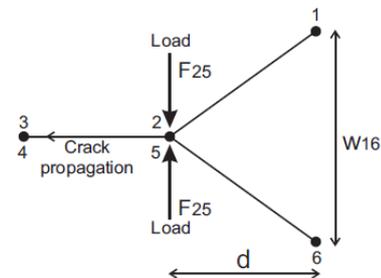
Perilaku kohesif dijelaskan dalam istilah persamaan pemisahan traksi atau pergeseran tegangan (Gambar 2). Seperti namanya, pendekatan ini menggantikan persamaan teknik *stress-strain* ($\sigma - \epsilon$) dengan persamaan pemisahan-traksi ($\sigma - \delta$). Ketebalan elemen diatur ke nol dengan menentukan node yang berlawanan secara kebetulan dari elemen kohesif. Namun, bahkan jika node yang berlawanan pada awalnya bertepatan, mereka masih terpisah entitas, dan mereka terpisah selama deformasi komposit laminasi. Antarmuka terpisah dari lapisan berlapis dapat dianggap sebagai terhubung satu sama lain melalui kekakuan elemen kohesif. Selama deformasi, pemisahan yang dihasilkan antara permukaan-permukaan yang terhubung dari lapisan-lapisan tersebut sebanding dengan sifat elemen kohesif [7].

C. Metode Virtual Crack Closure Technique (VCCT)

Teknik *virtual crack closure* (VCCT) dapat digunakan untuk menganalisis delaminasi pada material yang dilaminasi menggunakan pendekatan mekanika fraktur. Metode ini menerapkan *Linear-Elastic Fracture Mechanics* (LEFM). Hanya perambatan retak getas yang dimodelkan. Energi yang dihamburkan oleh pembentukan zona plastik di ujung retak tidak dipertimbangkan.



Gambar 2. Model pergeseran tegangan pada CZM.



Gambar 3. Model dan distribusi VCCT.

Kondisi untuk perambatan retak didasarkan pada prinsip-prinsip *Griffith* (persamaan 1). Untuk kasus deformasi mode tunggal dalam kondisi mode I, retakan bertambah ketika:

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} \geq 1 \tag{1}$$

dimana

G_I = Energy release rate (J/m²)

G_{Ic} = Energy release rate critical (J/m²)

Dalam VCCT, persamaan Irwin digunakan untuk menghitung perubahan energi peregangan U, yang dianggap sama dengan usaha yang diperlukan untuk penutupan retak, $W_{closure}$, yang dapat ditulis sebagai persamaan 2:

$$\frac{W_{closure}/\Delta A}{G_{Ic}} \geq 1 \tag{2}$$

dimana

$W_{closure}$ = Energi penutupan (J)

ΔA = Perbedaan area robekan (m²)

G_{Ic} = Energy release rate critical (J/m²)

Pekerjaan penutupan retak $W_{closure}$ dihitung dari pemisahan dan gaya nodal FE seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 3. Awalnya permukaan retak terikat erat. Pasukan nodal pada simpul kebetulan 2-5 dihitung dari solusi FE.

D. Critical Force

Critical force atau gaya kritis merupakan gaya yang diperlukan oleh beban untuk melakukan retakan pertama pada kegagalan material delaminasi. Nilai ini nantinya akan digunakan untuk memvalidasi hasil permodelan yang dilakukan oleh ANSYS, dimana diurai dalam Persamaan 3 sebagai berikut:

$$F_{crit} = \sqrt{\frac{G_{Ic} E_x b^2 h^3}{12 a_0^2}} \tag{3}$$

dimana

F_{crit} = Beban kritis (N)

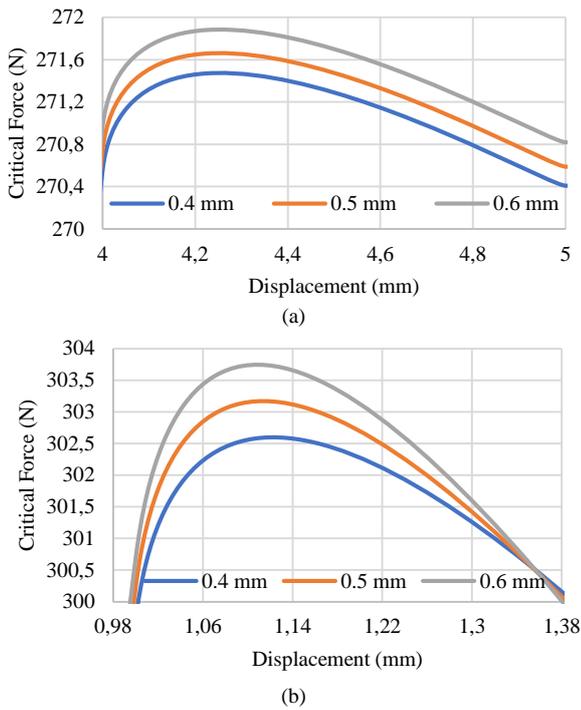
G_{Ic} = Energy release rate critical (J/m²)

E_x = Modulus Elastisitas sumbu X (Pa)

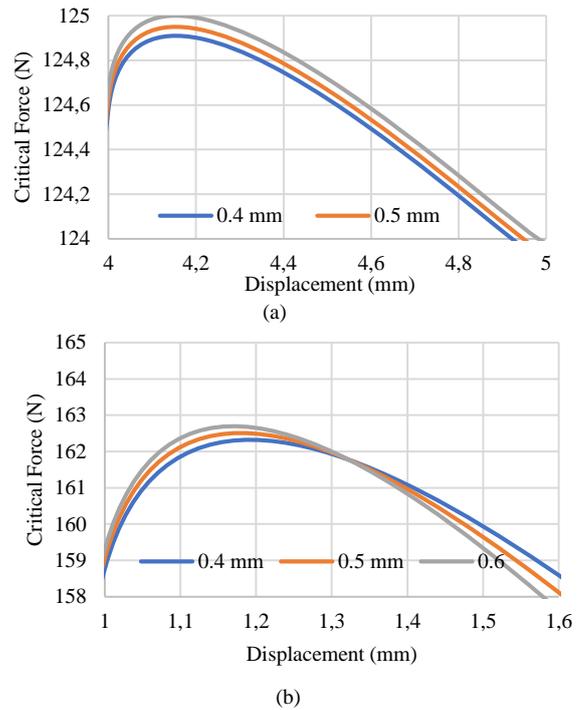
b = Lebar spesimen (m)

h = Tebal spesimen (m)

a = Panjang retakan awal spesimen (m)



Gambar 4. Perbandingan *mesh* pada nilai F_{crit} terhadap *displacement* pada material CFRP dengan; (a) Metode CZM, (b) Metode VCCT.



Gambar 5. Perbandingan *mesh* pada nilai F_{crit} terhadap *displacement* pada material GFRP dengan; (a) Metode CZM, (b) Metode VCCT.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Mesh Sensitivity

Pada penelitian ini, telah dilakukan *mesh sensitivity analysis* atau analisis sensitivitas *mesh*, dimana sebelum dilakukan penarikan kesimpulan dan melakukan simulasi, terlebih dahulu dilakukan pengujian keakuratan penggunaan ukuran elemen, dengan metode *mesh sensitivity analysis*. Pengujian nilai *mesh sensitivity* didasarkan terhadap nilai validasi pada besaran nilai *critical force*. Nilai *critical force* sendiri dievaluasi berdasarkan sifat bawaan material terhadap geometri yang akan diuji dan dihitung sebagaimana Persamaan 3.

Setelah dilakukan perhitungan manual, dan didapat data *critical force* dari ANSYS, maka dilakukan perhitungan persentase *error*, dimana persentase *error* digunakan untuk melihat seberapa besar kesalahan yang terjadi pada perhitungan simulasi. Persentase *error* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{V_{validation} - V_{ANSYS}}{V_{validation}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

dimana $V_{validation}$ = Nilai *critical force* teoritis (N)
 V_{ANSYS} = Nilai *critical force* simulasi (N)

Hasil dari simulasi ANSYS dapat dilihat pada grafik Gambar 4 untuk material CFRP dan Gambar 5 untuk material GFRP.

Grafik di atas merupakan grafik yang dihasilkan oleh F_{crit} terhadap beban *displacement* yang diberikan pada spesimen [8]. Dari grafik tersebut, didapat nilai beban kritis dari masing-masing material untuk setiap metode pada setiap ukuran elemen. Dari nilai tersebut, dilakukan validasi dengan nilai beban kritis teoritis untuk mencari *margin error* terendah menggunakan Persamaan 4, sehingga dapat ditentukan ukuran elemen paling optimal. Lebih rinci dapat

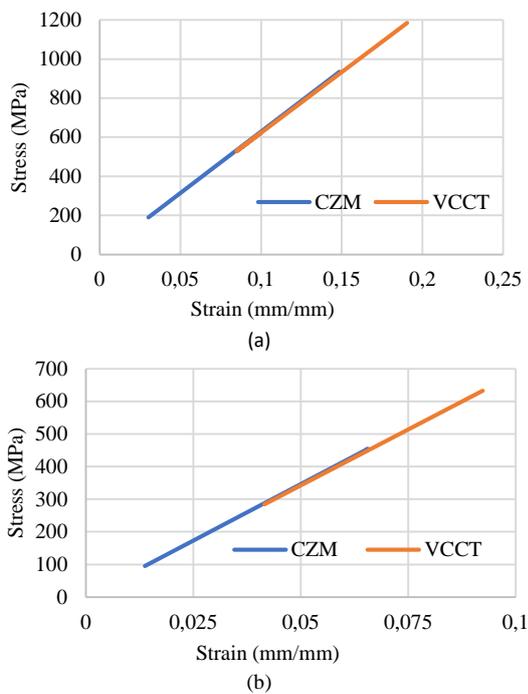
dilihat pada Tabel 1.

Dari Tabel 1, tampak terdapat anomali yang terjadi pada analisis *mesh* ini, dimana, khusus pada material CFRP dengan menggunakan metode CFRP. ukuran elemen yang digunakan memiliki hasil yang terbalik. Secara teori, semakin kecil ukuran mesh, maka nilai error yang dihasilkan semakin kecil pula, atau bisa dikatakan linear [9], namun pada penelitian ini ditemukan keterbalikan, dimana semakin kecil ukuran elemen yang digunakan, nilai *error* yang dihasilkan semakin besar, atau bisa dikatakan terbalik. Hal ini umumnya disebabkan oleh beberapa hal seperti banyaknya iterasi yang digunakan, konvergensi perhitungan, dan besaran nilai CP pada ANSYS *Mechanical*. Meski ukuran elemen pada metode CZM pada material CFRP ini tidak sesuai dengan tren pada teori, namun ukuran elemen 0.4 mm tetap dapat digunakan karena selisih error antar ukuran elemen relatif kecil. Berdasarkan perhitungan nilai *error* pada acuan nilai *critical force failure*, dapat disimpulkan dari tabel bahwa nilai *mesh* yang paling cocok digunakan untuk analisis simulasi delaminasi ini adalah ukuran 0.4 mm, karena memiliki nilai *error* pada *critical force* yang paling rendah diantara ukuran elemen yang diuji-cobakan.

Telah dilakukan simulasi delaminasi pada ANSYS dengan menguji semua variabel, yakni variabel material dan variabel metode, terlebih dahulu dilakukan uji *mesh sensitivity* dimana hasil simulasi ANSYS dibandingkan dan dikomparasi untuk mencari hasil yang paling *reliable*, dengan menguji kehalusan dan ukuran elemen. Pada subbab sebelumnya telah didapat kesimpulan bahwa nilai *mesh* dengan ukuran elemen 0.4 mm dan jumlah elemen 47250 memiliki hasil paling bagus dan *reliable*, dengan parameter nilai error yang paling kecil. Sehingga untuk pembahasan dan telaah hasil simulasi delaminasi, akan didasarkan pada pengujian dengan menggunakan ukuran elemen 0.4 mm.

B. Analisis Variasi Metode dan Material terhadap Karakteristik Delaminasi

Seperti yang telah dibahas pada subbab sebelumnya,



Gambar 6. Grafik *Stress-Strain* pada CFRP (a) dan GFRP (b).

terdapat beberapa data yang dapat di-*export* dan digunakan untuk pembahasan dalam mengamati beberapa parameter yang telah ditentukan dalam penelitian ini, yakni karakteristik delaminasi. Karakteristik delaminasi dapat ditentukan dengan mempelajari beberapa data, yakni kurva *Stress-Strain* dan *Stress-Strain Distribution*.

1) Pengaruh Metode dan Material terhadap Kurva *Stress-Strain*

Kurva *stress-strain* dapat digunakan sebagai langkah awal dalam menginspeksi dan mengevaluasi perbedaan yang terdapat dalam dua metode ini, yakni dengan membandingkan kurva *stress-strain* material yang sama dengan metode yang berbeda. Dalam subbab ini, akan dibahas seberapa besar pengaruh kedua metode tersebut, yakni CZM dan VCCT terhadap kurva *stress-strain* yang dihasilkan.

Data *stress-strain* didapat dari hasil simulasi delaminasi dengan melakukan pengujian pengambilan data atau *data examining* terhadap data keluaran ANSYS, yang mengaju kepada *Equivalent Stress* (von Mises Stress) dan *Equivalent Elastics Strain* (von Mises Strain). Setelah didapat data keduanya, kemudian diplot pada masing-masing titik sehingga didapat kurva *stress-strain*. Gambar di bawah ini menunjukkan kurva *stress-strain* yang dimiliki oleh GFRP dan CFRP dengan analisis oleh metode CZM dan VCCT.

Tampak dari Gambar 6 bahwa kurva yang dihasilkan dari kedua metode untuk kurva *stress-strain* saling berhimpit, artinya kedua garis memiliki nilai signifikansi yang rendah, sehingga dapat dikatakan nilai yang dihasilkan dari kedua metode hampir sama. Hal ini terjadi karena pada dasarnya kurva *stress-strain* dihasilkan oleh material yang dikenai beban, kemudian mengalami peregangan (*strain*) sebagai akibat dari respon terhadap beban yang diterima, dan murni dari sifat mekanika material. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa untuk pengaruh metode analisis delaminasi terhadap sifat intrinsik material dianggap tidak ada.

Namun pada grafik tersebut, tampak nilai maksimum VCCT lebih tinggi dibandingkan dengan nilai maksimum

Tabel 1. Hasil *Mesh Analysis Sensitivity*

Material	Model	Ukuran Elemen (mm)	Jumlah Elemen	Nilai Validasi (N)	Nilai ANSYS	Error (%)
CFRP	CZM	0,4	47250	287,23	270,55	5,8
		0,5	30000		270,59	5,79
		0,6	21000		270,82	5,71
	VCCT	0,4	47250		299,71	4,34
		0,5	30000		300,22	4,52
		0,6	21000		300,68	4,68
GFRP	CZM	0,4	47250	137,09	124,58	9,13
		0,5	30000		123,9	9,62
		0,6	21000		123,95	9,58
	VCCT	0,4	47250		152,7	11,38
		0,5	30000		159,05	16,02
		0,6	21000		159,3	16,2

CZM. Hal ini disebabkan karena pada metode VCCT, perhitungan beban awal delaminasi didasarkan pada *closure point*, mengacu pada Gambar 3, beban yang dihitung oleh metode VCCT dimulai pada perobekan titik-titik laminatnya, sehingga baru terhitung ketika *crack propagation* melewati *initial crack*, sedangkan metode CZM, sebagaimana dijelaskan pada Gambar 1 dan Gambar 2, ketika terdapat *displacement* sekecil apapun, akan terdapat perubahan terhadap nilai K_i , yang juga akan berpengaruh pada nilai *stress initiation* (σ).

2) Pengaruh Metode dan Material terhadap *Stress-Strain Distribution*

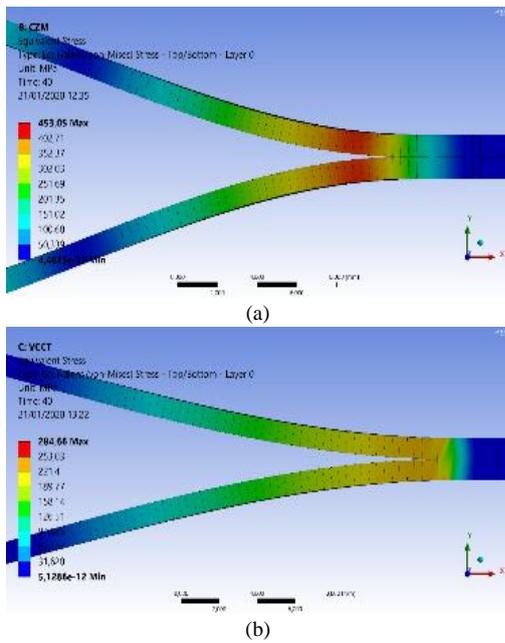
a. Material GFRP

Delaminasi pada GFRP telah didekati dengan 2 metode numerik yang berbeda, yakni CZM dan VCCT. Dari ketiga metode tersebut, juga menghasilkan data dan hasil yang berbeda pula. Hal ini dapat diamati pada perambatan retak. Dengan menggunakan *Equivalent Stress*, dapat dianalisis persebaran dan distribusi tegangan pada masing-masing metode ketika diberikan *displacement*.

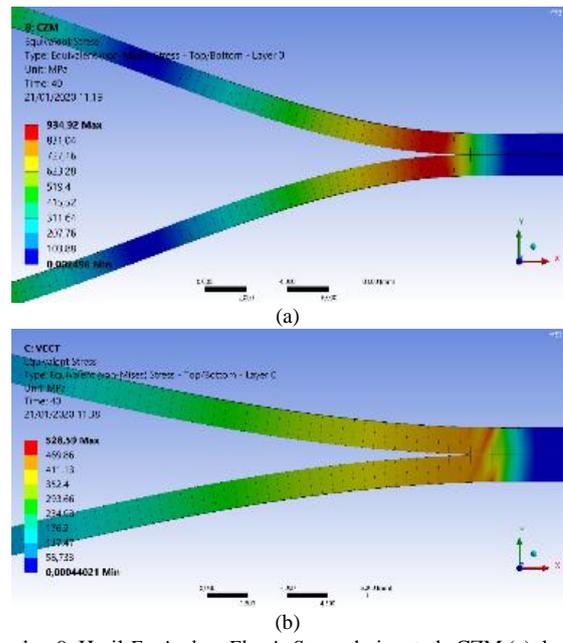
Dari sini, pada metode CZM dapat ditemukan pada *crack tip*, ketika diberikan *displacement* sebesar 40 mm, komposit mengalami tegangan tertinggi pada *crack tip* sebesar 453.05 MPa. Selain itu, *crack direction* juga lurus ke arah sumbu X. Model seperti ini juga dapat ditemukan di metode VCCT pada Gambar 7. Dengan memiliki model distribusi tegangan dan arah rambat retakan yang sama, metode VCCT mempresentasikan tegangan tertinggi pada *crack tip* sebesar 284.66 MPa, nilai yang cukup jauh berbeda bila dibandingkan dengan metode CZM. Perbedaan lain yang juga dapat diamati pada dua metode ini adalah persebaran atau distribusi tegangan pada *crack-tip*. Pada metode CZM, distribusi tegangan yang terjadi pada *crack-tip* lebih mencolok dibandingkan dengan bagian manapun pada GFRP.

Selain itu distribusi tegangan pada *crack-tip* cukup rata pada bagian atas dan bawah laminat [10]. Hal ini terlihat pada Gambar 8. Dibandingkan dengan CZM, metode VCCT menampilkan hal yang cukup berbanding terbalik. Dimana distribusi tegangan tidak terlalu besar pada *crack-tip*, selain itu juga distribusi tegangan pada *crack-tip* tidak simetris dan merata seperti metode CZM.

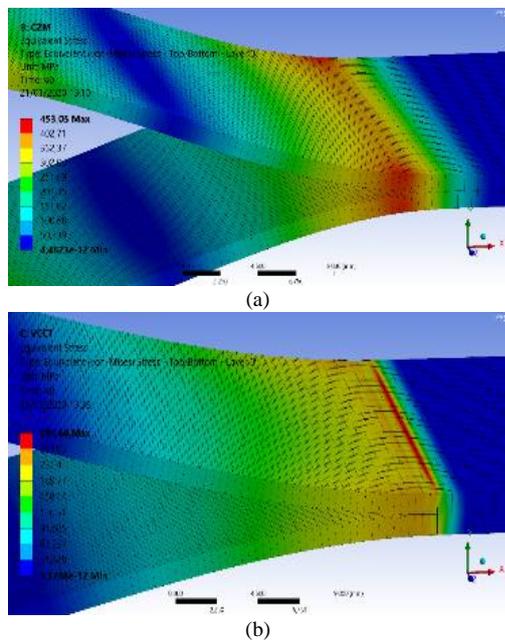
Meskipun memiliki model distribusi rambat retakan yang berbeda, nilai *equivalent stress* yang dihasilkan dari simulasi tidak jauh berbeda dantar satu metode dengan metode yang lain, hanya saja, untuk metode VCCT dan CZM, perambatan



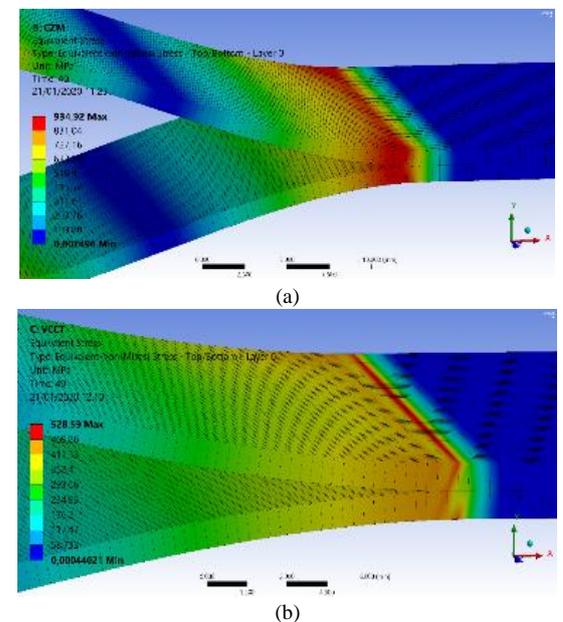
Gambar 7. Hasil *Equivalent Stress* pada Metode CZM (a) dan VCCT (b).



Gambar 9. Hasil *Equivalent Elastic Stress* dari metode CZM (a) dan VCCT (b)



Gambar 8. Tampak *Isometric* Distribusi Tegangan pada Metode CZM (a) dan (b)VCCT.



Gambar 10. Tampak *Isometric Equivalent Elastic Stress* dari metode CZM (a) dan (b) VCCT

retak terjadi pada bagian *interface delamination*, sehingga arah rambat retaknya lurus ke arah sumbu X dan tidak berbelok-belok.

b. Material CFRP

Delaminasi pada CFRP telah didekati dengan 2 metode numerik yang berbeda, yakni CZM dan VCCT. Dari dua metode tersebut, juga menghasilkan data dan hasil yang berbeda pula. Hal ini dapat diamati pada perambatan retak. Dengan menggunakan *Equivalent Stress*, dapat dianalisis persebaran dan distribusi tegangan pada masing-masing metode ketika diberikan *displacement*.

Dari sini, dapat ditemukan pada *crack-tip*, ketika diberikan *displacement* sebesar 30mm, komposit mengalami tegangan tertinggi pada *crack-tip* sebesar 934,92 MPa. Selain itu, *crack direction* juga lurus ke arah sumbu X. Model seperti ini juga dapat ditemukan pada metode VCCT seperti Gambar 9

Dengan memiliki model distribusi tegangan dan arah rambat retakan yang sama, metode VCCT mempresentasikan

tegangan tertinggi pada *crack tip* sebesar 528,59 MPa, nilai yang cukup jauh berbeda bila dibandingkan dengan metode CZM. Perbedaan lain yang juga dapat diamati pada dua metode ini adalah persebaran atau distribusi tegangan pada *crack-tip*. Pada metode CZM, distribusi tegangan yang terjadi pada *crack-tip* lebih mencolok dibandingkan dengan bagian manapun pada CFRP [11]. Selain itu distribusi tegangan pada *crack-tip* cukup rata pada bagian atas dan bawah laminat. Dibandingkan dengan CZM, metode VCCT menampilkan hal yang cukup berbanding terbalik. Dimana distribusi tegangan tidak terlalu besar pada *crack-tip*, selain itu juga distribusi tegangan pada *crack-tip* tidak simetris dan merata seperti metode CZM.

Meskipun memiliki model rambat retakan yang berbeda, nilai *equivalent stress* yang dihasilkan dari simulasi tidak jauh berbeda antar satu metode dengan metode yang lain, hanya saja, untuk metode VCCT dan CZM, perambatan retak terjadi pada bagian *interface delamination*, sehingga arah

Tabel 2.

Perbandingan Parameter Karakteristik Delaminasi			
No	Aspek Pemandangan	CZM	VCCT
1	Nilai Validasi F_{crit}	Berada pada margin atas	Berada pada margin bawah
2	Tegangan Maksimum	Berada pada <i>crack-tip</i>	Berada pada <i>crack-nodes</i>
3	Distribusi Tegangan	Distribusi relatif melengkung pada leher	Distribusi relatif lurus pada leher
4	Distribusi Regangan	Relatiif monoton dan simetris pada seluruh area <i>crack-tip</i>	Terdapat pola yang mirip seperti distribusi tegangan

rambat retaknya lurus ke arah sumbu X dan tidak berbelok-belok.

Pada Gambar 10, dapat ditemukan bahwa dikarenakan nilai maximum *equivalent stress*-nya berbeda, hal ini juga berakibat pada distribusi tegangan yang terjadi pada laminat bagian atas, dimana pada metode CZM terjadi pemusatan tegangan merata sepanjang area *crack-tip* [12]. Sedangkan untuk metode VCCT, pemusatan tegangan hanya terjadi pada bagian atas (*crack-nodes*) sepanjang garis *crack-tip*.

Hal ini telah sesuai dengan teori dari masing-masing metode. Seperti yang telah dipaparkan pada subbab 2.2, bahwa pada metode *cohesive zone*, kapasitas pemindahan tegangan antara dua wajah (*interfaces*) yang terpisah dari delaminasi tidak hilang sepenuhnya pada saat inisiasi kerusakan, tetapi lebih merupakan peristiwa progresif yang diatur oleh pengurangan progresif dari antarmuka antar antarmuka pada dua wajah yang terpisah. Sedangkan untuk metode VCCT, yang juga telah diuraikan pada Gambar 2 dimana energi yang dihamburkan oleh pembentukan zona plastik di ujung retak tidak dipertimbangkan. Selain itu juga pada Gambar 3 telah diproyeksikan model perambatan retak dengan VCCT, dimana terdapat penekanan beban pada titik 2 dan 5, dan akan terus bergeser sesuai dengan urutan, dimana hal ini bisa kita lihat pada hasil simulasi ANSYS Gambar 10 bagian kiri.

Dari pembahasan dan analisis penelitian simulasi delaminasi di atas, terdapat beberapa poin-poin parameter yang perlu digarisbawahi untuk mendapatkan kesimpulan dari komparasi antar dua metode dengan dua material yang berbeda. Dalam analisa dan pembahasan diatas, terdapat beberapa hal penting yang dapat diambil untuk dijadikan bahan analisis untuk penelitian lebih lanjut. Poin-poin tersebut terjelaskan secara rinci dalam Tabel 2, dan dari tabel tersebut, didapat parameter acuan penting yang dijabarkan dalam Tabel 3, dimana dua metode delaminasi yang telah digunakan, yakni CZM dan VCCT, dikomparasi secara menyeluruh.

IV. KESIMPULAN

Pada studi ini telah dilakukan komparasi dua metode delaminasi dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Workbench Academic Edition*. Hasil yang didapat adalah metode VCCT merupakan metode paling baik untuk digunakan dalam menganalisa delaminasi, karena memiliki kesesuaian kurva beban kritis secara teoritis, tidak

memerlukan banyak preparasi, dan memiliki nilai *margin*

Tabel 3.

Perbandingan Akhir Metode Delaminasi			
No	Parameter	CZM	VCCT
1	Kurva F_{crit} - <i>Displacement</i>	Kurang sesuai	Sesuai
2	Validasi <i>Error</i>	Memiliki nilai minimum 5.71%	Memiliki nilai minimum 4.34%
3	Preparasi Simulasi	Memerlukan <i>Interface Cohesive Delamination</i>	Memerlukan nilai <i>ERR</i>

error yang paling rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Laboratorium Simulasi dan Permodelan Material, Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, karena telah membantu dalam pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Wang and X. Xu, "Cohesive element analysis of fatigue delamination propagation in composite materials with improved crack tip tracking algorithm," *Compos. Struct.*, vol. 134, pp. 176–184, Dec. 2015.
- [2] J. A. Pascoe, R. C. Alderliesten, and R. Benedictus, "Methods for the prediction of fatigue delamination growth in composites and adhesive bonds - A critical review," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 112–113, pp. 72–96, Nov. 2013.
- [3] Sulistijono, *Mekanika Material Komposit*. Surabaya, 2012.
- [4] "Finite Element Modelling of Composite Materials and Structures | F. L. Matthews, G. A. Davies, D. Hitchings, C. Soutis, University of London | download." [Online]. Available: <https://book.asia/book/909403/adb4f3?regionChanged=&redirect>. [Accessed: 15-Jul-2020].
- [5] "Composite Materials - Science and Engineering | Krishan K. Chawla | Springer." [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9781493950157>. [Accessed: 15-Jul-2020].
- [6] "Finite Element Procedures - Klaus-Jürgen Bathe - Google Books." [Online]. Available: https://books.google.co.id/books/about/Finite_Element_Procedures.html?id=rWvfeGICf08C&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [Accessed: 15-Jul-2020].
- [7] E. J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Ansys®*, no. November. CRC Press, 2013.
- [8] M. M. Shokrieh, H. Rajabpour-Shirazi, M. Heidari-Rarani, and M. Haghpanahi, "Simulation of mode I delamination propagation in multidirectional composites with R-curve effects using VCCT method," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 65, pp. 66–73, Dec. 2012.
- [9] "Finite Element Simulation of Delamination in Carbon Fiber/Epoxy Laminate Using Cohesive Zone Model: Effect of Meshing Variation | Scientific.Net." [Online]. Available: <https://www.scientific.net/MSF.964.257>. [Accessed: 15-Jul-2020].
- [10] S. Mishani, R. Vamegh, R. Reem, and E. Brian, "Interlaminar modelling to predict composite coiled tube failure." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/319090090_Interlaminar_modeling_to_predict_composite_coiled_tube_failure. [Accessed: 15-Jul-2020].
- [11] S. Ramana Murthy Naidu and C. Rao, "Stress-Strain Analysis of Carbon-Epoxy Laminated Composites during Delamination by Finite Element Method," *Int. J. Emerg. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, no. 7, pp. 99–107, 2015.
- [12] X. Liu, R. Duddu, and H. Waisman, "Delamination Analysis of Composites using A Finite Element Based Discrete Damage Zone Model."