

Evaluasi Numerik untuk *Delaminasi* Komposit *Double Cantilever Beam* dengan *Cohesive Zone Model*

Nuri Setyo Taufiqurrahman, Mas Irfan P. Hidayat, dan Amaliya Rasyida

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: irfan@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Material komposit saat ini terus berkembang, salah satunya adalah material komposit laminat. Material komposit laminat terdiri dari lamina-lamina dimana ikatan yang berdekatan kerap terdeformasi, yang biasa disebut sebagai *delaminasi*. *Delaminasi* pada material komposit laminat dapat dianalisis menggunakan metode numerik dimana dalam penelitian ini menggunakan *software* yang berbasis elemen hingga, yaitu ANSYS Mechanical/APDL. Untuk mengetahui proses *delaminasi* yang terjadi, *double cantilever beam* di modelkan dengan pemberian beban berupa *displacement*. Variasi penelitian yang digunakan diantaranya arah serat, letak *initial crack*, dan panjang *initial crack*. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa, *double cantilever beam* dengan panjang *initial crack* 30 mm dan arah serat 0° memiliki *reaction force* yang paling tinggi, yaitu 116.68 N pada ketebalan *beam* yang sama. *Double cantilever beam* dengan panjang *initial crack* 55 mm dan arah serat 90° membutuhkan *reaction force* yang paling kecil diantaranya, yaitu 22.9 N. *Double cantilever beam* yang diberlakukan beberapa kasus memiliki tebal yang berbeda memberikan hasil yang menunjukkan bahwa semakin tebal *beam* maka *reaction force* yang dibutuhkan semakin besar.

Kata Kunci—*Cohesive Zone Model*, *Delaminasi*, *Double Cantilever Beam*, Komposit Laminat

I. PENDAHULUAN

DEWASA ini, material komposit sering digunakan untuk mengganti material-material konvensional. Hal ini dilakukan karena material komposit memiliki sifat material yang lebih unggul daripada material-material konvensional. Penggunaan material komposit ini sendiri sebenarnya sudah dimulai sejak ribuan tahun yang lalu, bahkan sebelum Masehi. Puncak penggunaan material komposit sendiri bermula pada akhir abad 20 dimana penggunaan material komposit banyak menggantikan material-material konvensional hingga sekarang [1].

Di dunia teknik, penggunaan material komposit sangat dominan dibidang aerospace dan otomotif, seperti mobil dan alat transportasi lain. Hal ini dikarenakan material komposit memiliki sifat kombinasi yang diinginkan di beberapa hal seperti perancangan struktur, biaya manufaktur, dan ketahanan fatik yang tidak didapatkan dari material konvensional [2].

Dominannya penggunaan material komposit menuntut industri manufaktur agar mampu memprediksikan kekuatan dan ketahanan material komposit dengan baik. Karena

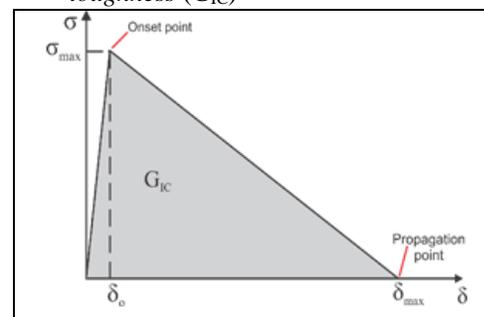
kegagalan pada material komposit dapat menyebabkan hal yang fatal. Salah satu kegagalan yang sering terjadi pada material komposit adalah pengelupasan antar lamina atau *delaminasi* [3]. Simulasi mengenai *delaminasi* yang terjadi material komposit dengan tiga variabel yang berbeda ini (arah serat, panjang *initial crack*, dan letak *initial crack*), diharapkan simulasi ini dapat digunakan untuk memprediksikan proses *delaminasi* yang terjadi pada material komposit laminat dengan menggunakan metode *cohesive zone model* pada simulasi menggunakan *software* yang berbasis elemen hingga, ANSYS Mechanical/APDL.

Cohesive zone model adalah teknik batasan kerja dari *continuum damage mechanics* yang dapat memprediksikan inisiasi dan perambatan *delaminasi* pada material komposit. [4]. Menurut Camanho [5], terdapat beberapa beberapa kelebihan dari metode ini, yaitu:

1. Mampu memprediksikan inisiasi dan pertumbuhan *delaminasi* tanpa membuat asumsi retak sebelumnya.
2. Dapat diaplikasikan pada struktur yang kompleks yang ditujukan untuk pembebanan yang kompleks.

Cohesive zone model menghubungkan *traction* dengan *displacement* pada *interface* dimana retakan atau *crack* dapat berkembang. Sifat dari *cohesive zone model* ini dinyatakan oleh Gambar 1. Kurva *bilinear* tersebut mempunyai sifat seperti berikut:

1. Area elastis awal memiliki sifat kekakuan (*stiffness*) yang tinggi hingga tegangan mencapai *interface strength* (σ_{max}).
2. Berikutnya diikuti dengan area pelunakan (*softening*) hingga tegangan mencapai nol.
3. Area dibawah kurva sama dengan *interlaminar fracture toughness* (G_{IC})



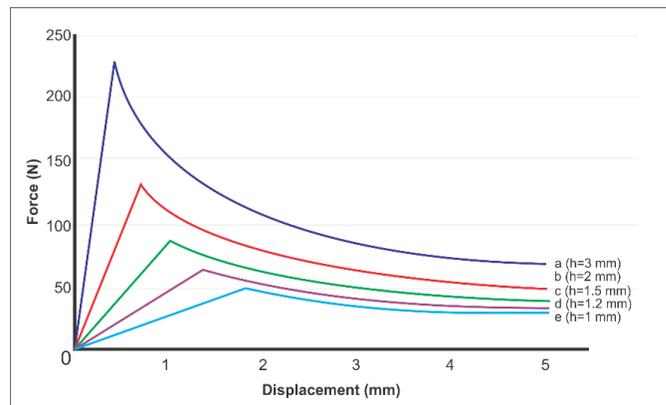
Gambar 1. *Bilinear constitutive equation cohesive element* [4]

M. Meo dan E. Thieulot (2005) melakukan penelitian menggunakan metode *cohesive zone model (CZM)*, *virtual crack closure technique (VCCT)*, dan *tiebreak contact*. Pada penelitian dengan teknik pertama dan kedua, *cohesive zone model* dengan perbedaan pada *interface*, memberikan hasil yang positif dimana kurva *load-displacement* menunjukkan tren yang sama. Sedangkan untuk teknik yang ketiga, VCCT, yang menggunakan *energy release rate* sebagai acuan menunjukkan tren yang tidak jauh berbeda dengan teknik pertama, CZM. Tren yang berbeda ditunjukkan oleh teknik keempat, *tiebreak contact*. Teknik ini tidak mampu memprediksikan proses pertumbuhan *delaminasi* dengan akurat. Alasan utama mengapa hal ini dapat terjadi adalah karena kriteria kegagalan yang ditetapkan berdasarkan pada tegangan maksimal *interlaminar* dan bukan pada *energy release rate* kritis walaupun terdapat pertumbuhan *delaminasi* sebelum *energy release rate* kritis tercapai [6].

Reis dkk. (2009) meneliti mengenai pengaruh panjang dari *initial crack* pada *fracture toughness* mode I dengan *double cantilever beam test*. Kegagalan *delaminasi* juga diprediksikan menggunakan metode simulasi dengan *exponential cohesive model*. Dari penelitiannya, Reis dkk. menyimpulkan bahwa *double cantilever beam* yang dimodelkan menggunakan *interface element* dengan metode energi kohesif sesuai dengan kurva *load-displacement* yang didapatkan secara numerikal dan eksperimental. Sensitivitas relatif cukup baik terhadap parameter numerik (G_{IC} dan ν_c). *Initial crack* yang semakin panjang akan menghasilkan *rigidity* yang lebih kecil dan tidak mempengaruhi *damage progression* [7].

Pada tahun 2014, Giuliese dkk. melakukan penelitian numerikal mengenai *delaminasi* menggunakan teknik *cohesive zone model*. Sebelumnya, Giuliese dkk. telah terlebih dahulu meneliti masalah *delaminasi* pada *beam* dua dimensi. Dengan bekal penelitian sebelumnya tersebut, Giuliese dkk. mengembangkan konsep ini lebih lanjut menjadi tiga dimensi. *Double cantilever beam* dengan Mode I dijadikan sebagai geometri penelitian. *Properties* dari material komposit yang digunakan telah ditentukan. Begitu pula dengan dimensi dari *double cantilever beam*. Hasilnya, penelitian yang dilakukan sesuai dengan teori yang ada [8].

Pada tahun 2014, Wassem dan Kumar melakukan penelitian menggunakan dua metode, yaitu VCCT dan CZM. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS Workbench dengan model dua dimensi. Keduanya memberikan hasil simulasi yang baik. Akan tetapi, VCCT menaksir *critical load* yang terlalu tinggi; sedangkan CZM menampilkan hasil yang memuaskan karena hasil dari pemodelan menunjukkan keserasian dengan hasil eksperimen untuk metode kontak dan *interface*. Selain itu, Wassem juga menyimpulkan bahwa dengan bertambahnya ketebalan *double cantilever beam*, maka gaya yang dibutuhkan untuk mendeformasikan *cohesive zone* akan semakin meningkat seperti pada Gambar 2. *Double cantilever beam* dengan ketebalan 3 mm membutuhkan *force* yang paling besar dibandingkan dengan *double cantilever beam* dengan tebal 2 mm, 1.5 mm, 1.2 mm, dan 1 mm [9].



Gambar 2. Kurva reaction *force-displacement* dengan ketebalan beam yang berbeda [9]

Penelitian ini mengkombinasikan beberapa variabel, spesimen, dan metode dari penelitian-penelitian sebelumnya mengenai *delaminasi*. Material komposit yang diteliti adalah material komposit *double cantilever beam* dengan serat karbon dan matriks epoksi. Penelitian numerik ini menggunakan *software* yang berbasis metode elemen hingga, ANSYS Mechanical/APDL, dengan variabel arah serat karbon, panjang *initial crack*, dan letak *initial crack*.

II. METODE PENELITIAN

A. Spesifikasi Material

Pada penelitian ini, digunakan material komposit berpenguat karbon dengan matriks epoksi. Tabel 1 menunjukkan *material properties* dari *double cantilever beam* dan Tabel 2 menunjukkan *material properties* dari *cohesive zone model*. Sifat dari material yang digunakan dalam penelitian diambil dari penelitian Camanho [5] yang telah dilakukan olehnya pada tahun 2002.

Tabel 1.
Sifat mekanik dari material komposit [5]

Sifat Mekanik	Nilai	Unit
Modulus Elasticity (E)	E ₁₁	150
	E ₂₂	11
	E ₃₃	11
Poisson's Ratio (ν)	ν ₁₂	0.25
	ν ₁₃	0.45
	ν ₂₃	0.25
Shear Modulus (G)	G ₁₂	6
	G ₁₃	3.7
	G ₂₃	6

Tabel 2.
Sifat mekanik dari *cohesive zone* [5]

Sifat Mekanik	Nilai	Unit
Maximum normal stress (σ_{max})	45	MPa
Fracture toughness Mode I (G_{IC})	0.268	kJ/m ²
Stiffness penalty (K)	10 ⁶	N/mm

B. Parameter

Terdapat tiga parameter yang digunakan pada penelitian ini, yaitu arah serat, letak *initial crack* (a_0), dan panjang *initial*

crack (a_0). Parameter ini dapat dilihat di Tabel 3. Dari parameter-parameter ini kemudian dibuat variasi penelitian seperti yang terlihat pada Tabel 4.

Tabel 3.
Parameter penelitian

Parameter	Arah Serat	Letak <i>Initial crack</i> (a_0)	Panjang <i>Initial crack</i> (a_0)
Kode	AS	MID/BOT	55/45/30
Variasi 1	0°	Tengah	55 mm
Variasi 2	90°	Bawah	45 mm
Variasi 3	-	-	30 mm

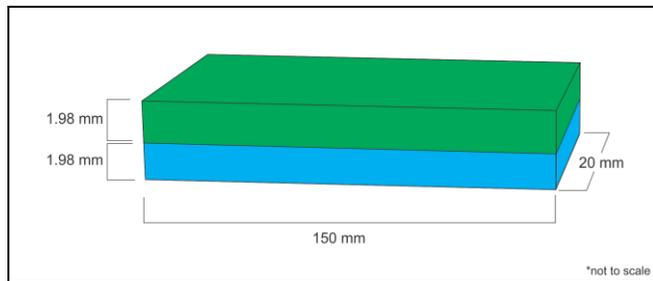
Tabel 4.
Variasi penelitian

Kasus	Arah Serat	Panjang <i>Initial crack</i>	Letak <i>Initial crack</i>	Kode
1	0°	55	Tengah	AS00-55-MID
2	90°	55	Tengah	AS90-55-MID
3	0°	55	Bawah	AS00-55-BOT
4	90°	55	Bawah	AS90-55-BOT
5	0°	45	Tengah	AS00-45-MID
6	90°	45	Tengah	AS90-45-MID
7	0°	45	Bawah	AS00-45-BOT
8	90°	45	Bawah	AS90-45-BOT
9	0°	30	Tengah	AS00-30-MID
10	90°	30	Tengah	AS90-30-MID
11	0°	30	Bawah	AS00-30-BOT
12	90°	30	Bawah	AS90-30-BOT

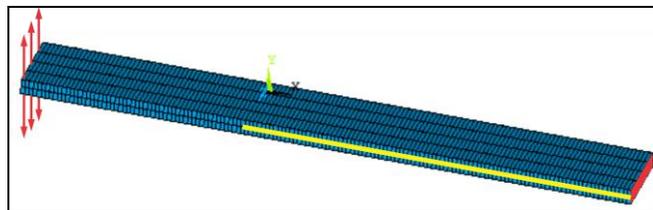
C. Pemodelan

Penelitian ini menggunakan *double cantilever beam* dengan dimensi seperti yang terlihat pada Gambar 3. Kemudian *double cantilever beam* ini disimulasikan dengan *software* yang berbasis elemen hingga, yaitu ANSYS Mechanical/APDL.

Double cantilever beam kemudian diberikan beban berupa *displacement* di salah satu ujung dan ujung lainnya dijepit ke segala arah, seperti yang terlihat pada Gambar 4.



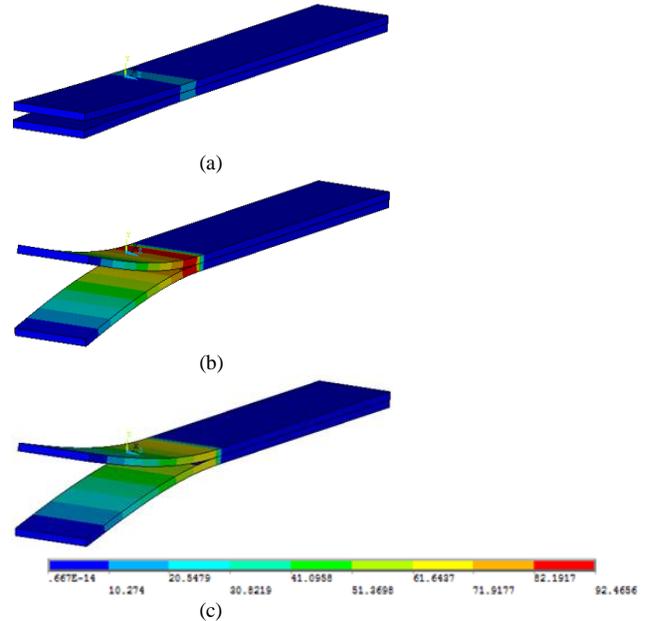
Gambar 3. Sketsa *double cantilever beam*



Gambar 4. *Double cantilever beam* yang telah dimodelkan pada ANSYS Mechanical/APDL dan diberikan *displacement*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

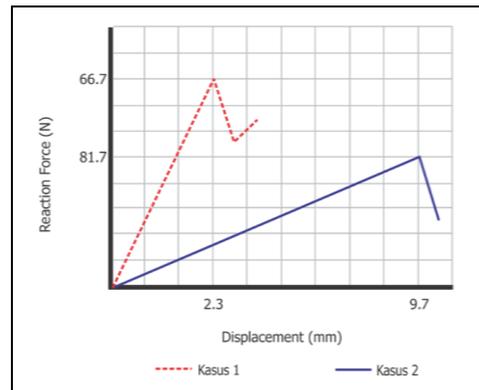
Proses *delaminasi* pada *double cantilever beam* yang telah diberikan beban berupa *displacement* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Proses *delaminasi* saat (a) awal pembebanan (b) tegangan maksimum (c) setelah tegangan maksimum

Tegangan maksimum tercapai saat *reaction force* (gaya yang dibutuhkan untuk merusak *cohesive zone*) maksimum dengan nilai *displacement* yang berbeda pada setiap variasi penelitian.

A. Pengaruh Arah Serat



Gambar 6. Kurva hasil pembebanan untuk arah serat yang berbeda pada kasus 1 dan 2

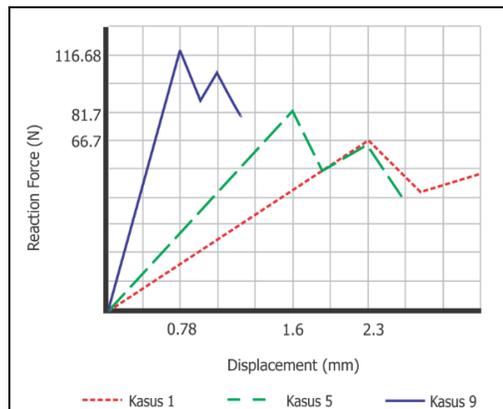
Dari Gambar 6 terlihat bahwa arah serat yang berbeda membutuhkan *reaction force* yang berbeda. Kasus dengan nomor urutan ganjil (kasus 1,3,5,7,9, dan 11) memiliki konfigurasi arah serat 0°. Hasilnya, *reaction force* yang dibutuhkan lebih besar daripada kasus dengan nomor urutan genap (kasus 2,4,6,8,10, dan 12) yang memiliki konfigurasi arah serat 90°. Hal ini sesuai dengan teori bahwa kekuatan material komposit bernilai besar pada arah fiber dan bernilai kecil ada arah melintang [1], [10].

B. Pengaruh Panjang Initial Crack

Terdapat tiga variasi panjang *initial crack* pada penelitian ini, yaitu 55 mm, 45 mm, dan 30 mm. Hasil pada tiap variasi dapat dilihat pada Tabel 5. Selain itu, Gambar 5 juga memberikan informasi mengenai perbedaan *nilai reaction force* dan *displacement*.

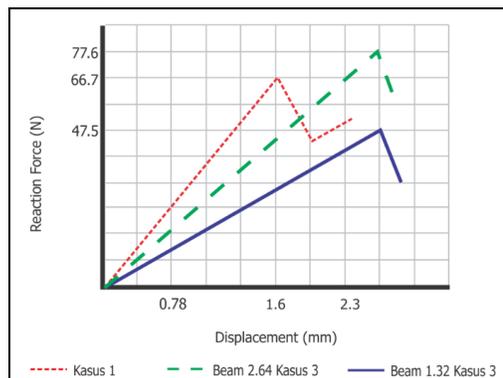
Pada Gambar 7 terlihat bahwa semakin kecil *initial crack* maka semakin besar *reaction force* yang dibutuhkan untuk merusak *cohesive zone*. Kasus 1 memiliki panjang *initial crack* 30 mm dengan *reaction force* sebesar 116.68 N, kasus 5 45 mm dengan *reaction force* 81.7 N, dan kasus 9 55 mm dengan *reaction force* 66.7 N. Hal ini sesuai dengan teori yang ada [11], [7].

Gambar 8 menunjukkan bahwa letak dari *initial crack* mempengaruhi *reaction force* yang dibutuhkan untuk merusak *cohesive zone*. Letak *initial crack* yang berada ditengah-tengah (seperti Gambar 3) memiliki nilai *reaction force* yang berbeda dengan *initial crack* yang berada di bagian bawah (seperti Gambar 9). Semakin tebal *beam*, maka semakin besar nilai *reaction force*. Kato dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa semakin tipis *coating* maka proses *delaminasi* akan semakin mudah terjadi [12]. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan. *Beam* dengan ketebalan 2.64 mm membutuhkan *reaction force* lebih besar daripada *beam* dengan ketebalan 1.98 mm dan 1.32 mm.

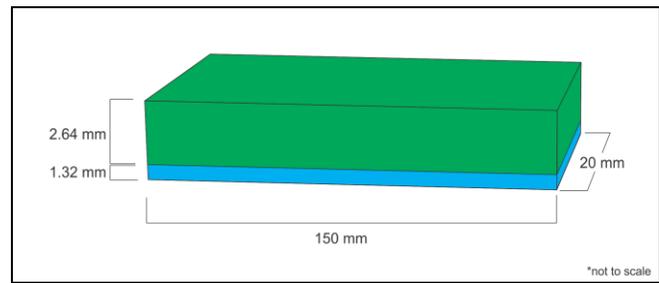


Gambar 7. Kurva hasil pembebanan untuk panjang *initial crack* yang berbeda pada kasus 1, 2, dan 9

C. Pengaruh Letak Initial Crack



Gambar 8. Kurva hasil pembebanan untuk letak *initial crack* yang berbeda pada kasus 1 dan 3



Gambar 9. *Double cantilever beam* dengan ketebalan yang berbeda

Dari hasil ini diketahui bahwa susunan material komposit harus disesuaikan dengan kebutuhan sifat material yang diinginkan, misalnya komponen sayap terbang. Samsu dan Pramono (2012) menyatakan bahwa komponen sayap pesawat terbang hendaknya memiliki tegangan maksimum yang tinggi. Dalam penelitiannya, perbedaan arah serat memberikan efek yang cukup signifikan. Sayap pesawat dengan arah serat 0° mampu menahan tegangan lebih tinggi 87.9% dibandingkan dengan arah serat 90°. Oleh karena itu, jika material komposit diaplikasikan sebagai material sayap pesawat, maka arah serat dengan orientasi 0° akan memberikan kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan material komposit dengan orientasi arah serat 90° [13]

Nilai *displacement* untuk semua kasus dengan arah serat 0° lebih rendah dibandingkan dengan kasus dengan arah serat 90°. Munasir (2011) dalam penelitian eksperimentalnya juga mendapati hasil yang sama. Material komposit yang hanya memiliki arah serat longitudinal memiliki nilai elongasi yang lebih rendah daripada material komposit dengan dua arah serat yang berbeda. Sehingga untuk mendapatkan material komposit dengan elongasi yang lebih baik dan nilai kekuatan yang baik maka dapat digunakan kombinasi laminat dengan perpaduan dua arah yang berbeda [14].

IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa arah serat berpengaruh terhadap sifat material komposit. Nilai *reaction force* dari material komposit dengan arah serat 0° lebih besar rata-rata 66% dibandingkan dengan nilai *reaction force* dengan arah serat 90°. Posisi *initial crack* juga memberikan pengaruh terhadap *reaction force*. Hal ini berkaitan dengan ketebalan *beam*. *Beam* yang memiliki tebal 2.64 mm rata-rata membutuhkan *reaction force* 30% lebih besar dibandingkan dengan *beam* dengan ketebalan 1.32 mm. Selain itu, panjang *initial crack* memiliki andil yang cukup besar dalam proses *delaminasi*. *Initial crack* yang memiliki panjang 30 mm cenderung membutuhkan *reaction force* 31% lebih besar jika dibandingkan dengan *initial crack* dengan panjang 45 mm dan 42% dengan 55 mm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini, terutama kepada keluarga tercinta yang telah memberikan

dukungan moril dan materil yang tiada henti.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sulistijono. 2012. *Mekanika Material Komposit*. ITS Press: Surabaya.
- [2] Campbell, F.C. 2010. *Structural Composite Materials*. ASM International. United States.
- [3] Garg, Amar. 1988. *Delamination-A Damage Mode in Composite Structures*. Aeronautical Engineering Department, Indian Institute of Technology, Bombay-400 076, India.
- [4] Seedifar, Milad, dkk. 2015. *Prediction of Delamination Growth in Laminated Composites Using Acoustic Emission and Cohesive Zone modeling Techniques*. Elsevier: 120-127.
- [5] Camanho, P. Pedro, Davila. 2002. *Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials*. NASA/TM-2002-211737.
- [6] Meo, M., dan E. Thieulot. 2005. *Delamination Modelling In A Double cantilever beam*. Elsevier: 29-43.
- [7] Reis, dkk. 2009. *Analysis Of The Initial Delamination Size On The Mode I Interlaminar Fracture Of Carbon/Epoxy Composites*. *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, page: 2609-2621.
- [8] Giuliese, G., A. Pirondi, dan F. Moroni. 2014. *A Cohesive Zone model for Three-dimensional Fatigue Debonding/ Delamination*. *Procedia Materials Science* 3: 1473 – 1478.
- [9] Wasseem, Mohammed, dan Kirain Kumar. 2014. *Finite Element Modelling for Delamination Analysis of Double cantilever beam Specimen*. SSRG-IJME. India.
- [10] Callister, William. 2010. *Materials Science and Engineering*. John Wiley and Sons, Inc. United States of America. Page: 660.
- [11] Anderson, Ted. 2005. *Fracture Mechanics: Fundamental and Applications*. Taylor and Francis. Boca Raton. Hal: 25-31.
- [12] Kato, Masahiko, dkk. 2013. *Effects of coating thickness and interfacial roughness on cracking and delamination strength of WC-Co coating measured by ring compression Test*. IOP Publishing: Jepang
- [13] Hidayat, Samsu, dan Agus Sigit Pramono. 2012. *Kajian Pengaruh Arah Serat Komposit Pada Sayap HSFTB V2 Berdasarkan Gaya Aerodinamika*. ITS Surabaya.
- [14] Munasir. 2011. *Studi Pengaruh Orientasi Serat Fiber Glass Searah dan Dua Arah Single Layer terhadap Kekuatan Tarik Bahan Komposit Polypropylene*. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya*. Universitas Negeri Surabaya.