

## **ANALISIS KERUSAKAN PELAT KOMPOSIT AKIBAT BEBAN *LOW VELOCITY IMPACT* TERHADAP VARIASI ENERGI IMPAK DENGAN MENGGUNAKAN *ELEMENT SPLIT***

**Muhammad Hadi Widanto<sup>(1)\*</sup>, Eggy Surya<sup>(2)</sup>, , Amat Chaeroni<sup>(3)</sup>,**

(1)(2)(3)Prodi Teknik Penerbangan, Fakultas Teknik Kedirgantaraan, Universitas Dirgantara  
Marsekal Suryadarma, Jakarta, Indonesia

\*Email: [mhadi@unsurya.ac.id](mailto:mhadi@unsurya.ac.id)

**Abstrak** - Komposit merupakan material yang paling banyak digunakan pada struktur pesawat terbang. Hal ini karena material komposit memiliki kekuatan struktur yang tinggi dan berat yang ringan. Namun komposit mempunyai kelemahan yaitu tidak tahan terhadap beban impak karena sifatnya yang getas. Beban impak dapat terjadi akibat *human error* pada saat dilakukan perawatan akibat benda jatuh atau karena tumbukan benda asing lainnya. Pada penelitian ini dilakukan simulasi impak struktur komposit untuk mengetahui ketahanan komposit dengan variasi energi impak. Pada simulasi impak menggunakan metode elemen hingga dengan memodelkan intralaminar dan interlaminar menggunakan metode kegagalan hashin dan *cohesive zone model*. Penelitian terhadap pengaruh *element split* yang dimodelkan pada pelat komposit menjadi penelitian utama. Dari hasil menunjukkan pengaruh *element split* terhadap respon dinamik dan kerusakan delaminasi dapat memberikan hasil dengan korelasi yang lebih baik terhadap hasil eksperimen.

**Kata Kunci:** komposit, *Low Velocity Impact*, *Cohesive Zone Model*, *Element Split*,

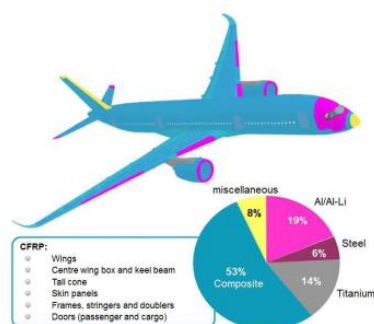
**Abstract** - Composites are the most widely used material in aircraft structures. This is because composite materials have high structural strength and light weight. However, composites have a weakness that is not resistant to impact loads due to their brittle nature. Impact loads can occur due to human error during maintenance due to falling objects or due to the impact of other foreign objects. In this study, an impact simulation of composite structures was carried out to determine the durability of composites with variations in impact energy. The impact simulation uses the finite element method by modeling the intralaminar and interlaminar using the hashin failure method and the cohesive zone model. Research on the effect of split elements modeled on composite plates is the main research. The results show that the effect of element split on dynamic response and delamination damage can provide results with better correlation to experimental results.

**Keywords:** Composite, *Low Velocity Impact*, *Cohesive Zone Model*, *Element Split*

## I. PENDAHULUAN

Penggunaan komposit saat ini semakin maju dan berkembang. Hal ini dapat dilihat dari mulai diproduksi komposit pada industri penerbangan dimana material komposit banyak digunakan pada struktur pesawat terbang[1]. Material pesawat terbang harus mewakili kriteria material yang cocok digunakan pada pesawat terbang antara lain, ringan, kaku, tidak mudah patah, tangguh serta tahan terhadap getaran maupun korosi, yang terdapat pada material komposit. Untuk material pesawat terbang, umumnya dipergunakan aluminium sebagai matriks dan carbon sebagai serat (fiber), dan penggabungan/paduan kedua material tersebut akan didapat material yang keras (kaku), tahan suhu tinggi sekaligus ringan dan lentur[2].

Komposit paling sering digunakan pada kulit sayap pesawat, penutup mesin, serta *fairing* selama bertahun-tahun. Banyak pesawat baru juga menggunakannya untuk struktur *fuselage* seperti rangka dan kulit, dan terus dikembangkan pada material lain karena memiliki sifat ringan dan kuat[3], [4]. Komposit lebih jarang digunakan dalam mekanisme[2]. Adapun salah satu contoh pengaplikasian yang menggambarkan penggunaan material komposit pada pesawat terbang dengan tipe pesawat Airbus A350 ditunjukkan pada **Gambar 1.1**.



**Gambar 1.1** Material Penyusun pesawat modern Airbus A350 XWB[5]

Selain memiliki banyak keunggulan, material komposit juga memiliki kelemahan dibandingkan dengan material berbahan logam. Material komposit memiliki kelemahan lebih sensitif terhadap kerusakan beban impact dibandingkan dengan material logam dikarenakan mode kerusakan yang berbeda[6]. Kerusakan akibat beban impact pada material komposit akan mengakibatkan penurunan dari kekuatan sisa dan durability dari pada struktur komposit dan dapat menyebabkan kegagalan catastrophic. Berdasarkan hal tersebut, tentunya banyak penelitian dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan dan karakteristik kegagalan material komposit akibat beban impact.

Pada penelitian ini dilakukan simulasi impact struktur komposit untuk mengetahui ketahanan komposit dengan variasi diameter impactor dan energi impact. Pada simulasi impact menggunakan metode elemen hingga dengan memodelkan intralaminar dan interlaminar menggunakan metode kegagalan hashin dan *cohesive zone model*.

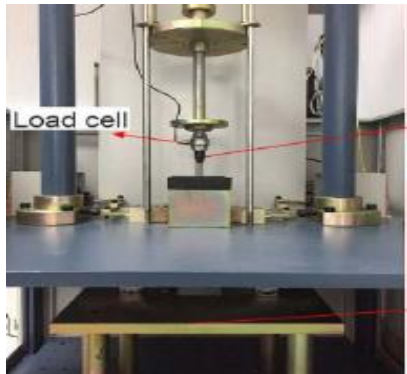
## II. METODE PENELITIAN

### 2.1 Model Eksperimen

Pada penelitian skripsi ini memerlukan data eksperimen adapun data eksperimen di dapat dari jurnal dan digunakan sebagai perbandingan dengan hasil simulasi yang didapat. Pada eksperimen, spesimen yang digunakan dalam penelitian dibuat dari lamina komposit karbon/epoksi searah T300/YH69. Lamina komposit mempunyai ukuran 150 mm x 100 mm dengan ketebalan lapisan sebesar 0.14 mm dan memiliki kerapatan 1678 kg/m. Seperti yang direkomendasikan dalam ASTM D7136, lamina komposit dibuat dengan menumpuk 32 lapis mengikuti urutan susun  $[45/0/-45/90]_{4s}$ . [7]

Peristiwa tumbukan kecepatan rendah dilakukan sesuai dengan ASTM D7136 dengan mesin uji *drop-weight* ZBG-0390 (**Gambar 2.1**). Spesimen didukung

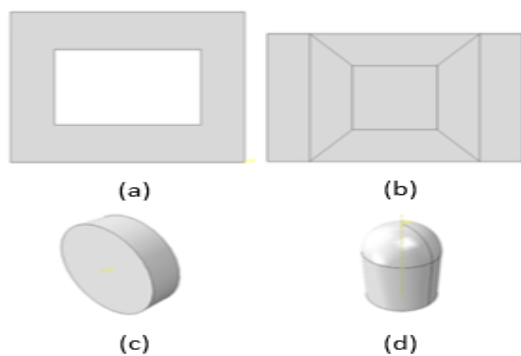
perlengkapan pendukung dengan *cut-out* 125 x 75 mm, dan empat klem diadopsi untuk menahan spesimen dengan diameter *clamp* 14 mm. Pada pemodelan eksperimen kepala penabrak setengah bola diameter 16 mm, dan tiga energi tumbukan 7J, 17J dan 27J diambil untuk setiap diameter.



**Gambar 2.1** uji impak pada pelat komposit[7]

## 2.2 Pemodelan Simulasi

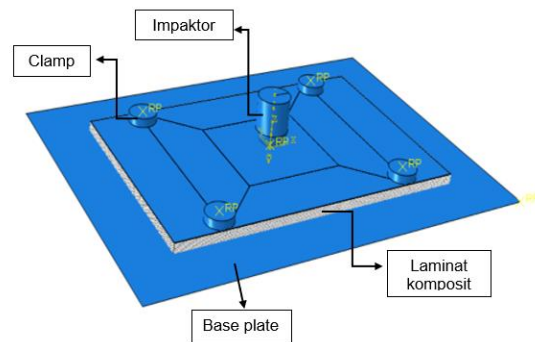
Pembuatan pemodelan simulasi *Low Velocity Impact* ini berdasarkan pada standar ASTM D7136 dan menggunakan 4 komponen dalam mensimulasikannya, adapun komponen yang digunakan dalam mensimulasikan penelitian ini yaitu *base plate*, pelat komposit, *clamp*, dan impaktor yang dapat ditunjukkan pada **Gambar 2.2**.



**Gambar 2.2** (a) *Base plate* (b) laminat komposit (c) *clamp* (d) impaktor

Pada *base plate* dibuat dengan tipe *rigid* yang artinya tidak bisa berdeformasi dan pada bagian tengahnya dibuat lubang persegi panjang dengan ukuran 125 mm x 75 mm. Kemudian terdapat komponen

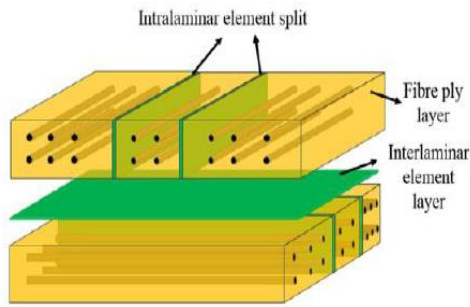
*clamp* yang berguna untuk menahan spesimen pada saat pengujian, dalam pengujian LVI menggunakan 4 *clamp* dibuat dengan tipe *rigid* dengan ukuran yang sama diameter 14 mm dan tinggi 4 mm. Selanjutnya pada komponen impaktor dibuat bertipe *rigid* dengan berbentuk *hemispherical* berdiameter 16 mm. Massa konstan 2.2 kg dipilih untuk semua uji tumbukan variasi energi berdasarkan nilai kecepatan. Setiap komponen kemudian ditempatkan sesuai dengan kondisi eksperimen ditunjukkan pada **Gambar 2.3**. Pembuatan pemodelan LVI ini menggunakan aplikasi *software Abaqus CAE*.



**Gambar 2.3** Bagian-bagian komponen dalam simulasi

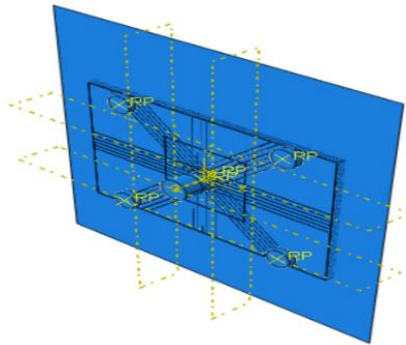
Kemudian pada penelitian ini akan memodelkan pengujian *Low Velocity Impact* menggunakan *intralaminar element split*. melakukan pengujian *static indentation test* pada laminat komposit yang mana menghasilkan mode kegagalan yang sama dengan kasus LVI dan memberikan *split* pada *interlaminar element* dengan bentuk vertikal dan berpotongan sesuai dengan arah serat untuk menampilkan potensi jalur *matrix cracking* ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.

Pada pemodelannya laminat komposit menggunakan 6 buah *intralaminar element split* dengan mendefinisikan *cohesive contact* pada setiap lapisan dengan jarak antar *splits* sebesar 3 mm.



Gambar 2.4 Intralaminar element split<sup>[8]</sup>

Pada simulasi *Low Velocity Impact* menggunakan material *carbon/epoxy unidirectional* T300/YH69 yang pada eksperimen nya juga menggunakan material yang sama. Properti material carbon/epoxy ditunjukkan pada **Tabel 2.1**



Gambar 2.5 *Set-up* simulasi LVI dengan 6 split

Tabel 2.1 Material properti T300YH/69<sup>[7], [9]</sup>

Properties	Nilai
Densitas	1678 kg/m <sup>3</sup>
Elastic Properties	E <sub>11</sub> = 140 Gpa, E <sub>2</sub> = E <sub>3</sub> 9 Gpa, G <sub>12</sub> = G <sub>13</sub> = 4.6 Gpa G <sub>23</sub> = 3.08 Gpa, ν <sub>12</sub> = ν <sub>13</sub> 0.32, ν <sub>23</sub> = 0.52
Strength parameter	X <sup>T</sup> = 1760 Mpa, X <sup>C</sup> = 1100 Mpa, Y <sup>T</sup> = 51 Mpa Y <sup>C</sup> = 130 Mpa, S <sup>L</sup> = 70 Mpa, S <sup>T</sup> = 60 Mpa
Fracture energies	G <sub>c,f</sub> <sup>T</sup> = 56 N/mm, G <sub>c,f</sub> <sup>C</sup> = 10 N/mm, G <sub>c,m</sub> <sup>T</sup> = 0.25 N/mm G <sub>c,m</sub> <sup>C</sup> = 0.75 N/mm
Cohesive properties	K <sub>nn</sub> = K <sub>ss</sub> = K <sub>tt</sub> = 180000 Mpa σ <sub>n</sub> = 60 Mpa, σ <sub>s</sub> = σ <sub>t</sub> = 80 Mpa G <sub>n</sub> <sup>c</sup> = 0.35 N/mm, G <sub>s</sub> <sup>c</sup> = G <sub>t</sub> <sup>c</sup> = 1.45 N/mm

### 2.3 Metode Pemodelan Komposit

Pada kerusakan intralaminar terdapat suatu metode kegagalan yang dapat di uji coba pada Abaqus secara default berasosiasi dengan teori kegagalan komposit (kriteria *hashin's damage*). Kriteria tersebut memiliki kemampuan untuk memodelkan beberapa mode kerusakan seperti *matrix tensile* dan *matrix compression* serta fiber *breakage tensile* dan fiber *compression* yang dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut<sup>[10], [11], [12]</sup>:

$$\text{Fiber Tension } \sigma_{11} \geq 0 \quad F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (2.1)$$

$$\text{Fiber Compression } \sigma_0 < 0 \quad F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^c}\right)^2 \quad (2.2)$$

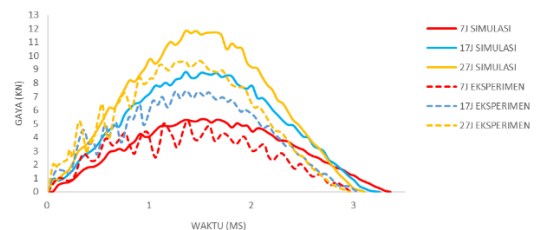
$$\text{Matrix Tension } \sigma_{22} \geq 0 \quad F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (2.3)$$

$$\text{Matrix Compression } \sigma_{22} < 0 \quad F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y^c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (2.4)$$

## III. HASIL DAN ANALISIS

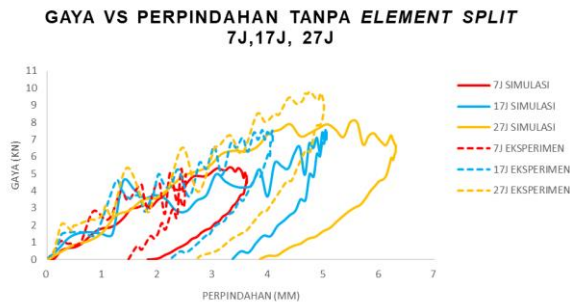
### 3.1 Hasil simulasi *Impact* tanpa menggunakan *element split*

GAYA VS WAKTU TANPA SPLIT  
7J, 17J, 27J



Gambar 3.1 grafik gaya terhadap waktu tanpa *element split* dengan variasi energi

Pada **Gambar 3.1** menunjukkan perbandingan hasil eksperimen dengan simulasi tanpa *element split*. Hasil dapat diperhatikan bahwa *peak force* pada hasil simulasi selali nilainya lebih tinggi secara konsisten. Hasil grafik gaya terhadap waktu menunjukkan gaya maksimum pada energi 7 joule didapat sebesar 5.30 kN, 17 joule sebesar 8.40 kN, dan 27 joule sebesar 11.72 kN.

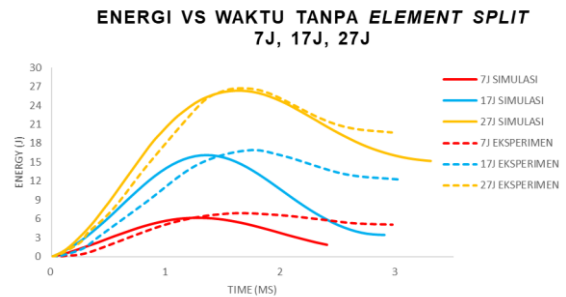


**Gambar 3.2** grafik gaya terhadap perpindahan tanpa *element split* dengan variasi energi

Pada **Gambar 3.2** menunjukkan perbandingan hasil eksperimen dengan simulasi tanpa *element split*. Hasil menunjukkan simulasi tanpa *element split* memberikan respon dinamik yang lebih kaku dibandingkan dari hasil eksperimen secara konsisten pada setiap variasi energi. Perpindahan maksimum pada energi 7 joule didapat sebesar 3.60 mm, 17 joule sebesar 5 mm dan 27 joule sebesar 6.29 mm.

Pada **Gambar 3.3** menunjukkan perbandingan grafik energi terhadap waktu pada hasil simulasi tanpa menggunakan *element split*. Pada hasil grafik juga dapat dilihat bahwa maximum energi pada hasil simulasi lebih kecil dibandingkan dengan hasil eksperimen. Selain itu pada bagian akhir grafik yang menentukan besaran

energi yang terserap dan tidak terserap. Terlihat energi yang terserap pada simulasi lebih kecil dibandingkan dari eksperimen.



**Gambar 3.3** Kurva energi terhadap waktu tanpa *element split* dengan variasi energi

Dari ketiga hasil grafik diatas dapat dilihat bahwa hasil simulasi berbeda dengan hasil eksperimen. Hal ini dikarenakan pada model tanpa menggunakan *element split* maka mode kerusakan seperti retak pada matriks dan serat putus tidak dapat ditampilkan. Karena tidak tampilkan kerusakan pada model, maka berimplikasi pada hasil respon dinamik dari setiap grafik yang memiliki respon yang berbeda dengan hasil eksperimen.

**Tabel 3.1** Perbandingan hasil eksperimen dan simulasi tanpa *element split*

Perbandingan	TANPA ELEMENT SPLIT								
	7J			17J			27J		
	Eksperimen	Simulasi	Errorr(%)	Eksperimen	Simulasi	Errorr(%)	Eksperimen	Simulasi	Errorr(%)
Max Impact Load (kN)	5.19	5.35	3.08	7.42	8.81	18.73	9.62	11.84	23.08
Time at the max load (ms)	1.36	1.49	9.56	1.35	1.34	-0.74	1.48	1.34	-9.46
Impact duration (ms)	2.97	3.34	12.46	3.02	3.60	19.21	2.88	2.95	2.43
Max displacement (mm)	2.5	3.6	44.00	4.06	5.04	24.14	4.99	6.29	26.05
Absorted Impact energy (J)	6.79	6.17	-9.13	16.99	16.09	-5.30	26.74	26.33	-1.53
Residual displacement	1.47	1.81	23.13	2.22	1.21	-45.50	2.71	1.30	-52.03

Pada **Tabel 3.1** menunjukkan persentase deviasi pada setiap parameter untuk membandingkan antara hasil simulasi dan eksperimen. Pada parameter *max impact load* semakin besar gaya impact, semakin besar persentase kesalahan. Hal ini terjadi dikarenakan kerusakan yang terjadi semakin besar dengan semakin besarnya energi impact.

Kerusakan yang tidak tergambarkan pada simulasi maka respon akan semakin beda dengan hasil eksperimennya.

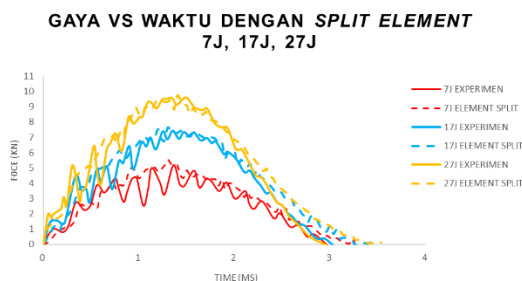
Tidak tergambarnya respon kerusakan pada model tampaknya hampir berimplikasi pada setiap parameter baik itu akan semakin mendekati hasil eksperimen atau menjauhi hasil eksperimen. Oleh

karena itu perlunya pengembangan model lain yang dapat memperhitungkan efek kerusakan sehingga model akan lebih dekat dengan hasil eksperimen.

### 3.2 Hasil simulasi *impact* dengan menggunakan *element split*

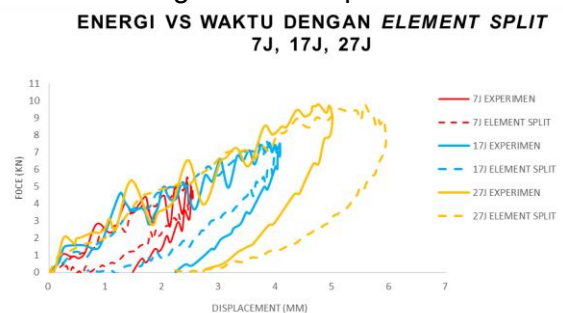
Penggunaan *element split* pada model bertujuan untuk menggambarkan kerusakan seperti retak pada matriks maupun kerusakan putus serat yang berfokus pada model kerusakan pada area *intralaminar*. Model tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran sesuai dengan mode kerusakan yang terjadi pada hasil eksperimen. Dengan mode kerusakan yang berusaha untuk disesuaikan pada model maka dapat memberikan respon dinamik yang sesuai dengan hasil eksperimen.

Pada **Gambar 3.4** menunjukkan grafik gaya terhadap waktu hasil eksperimen dan simulasi dengan menggunakan *element split*. Dapat dilihat perbandingan hasil grafik eksperimen dan simulasi memiliki korelasi yang lebih baik dibandingkan dengan model sebelumnya yang tidak menggunakan *element split*. Nilai *max impact load* pada setiap variasi energi 7J, 17J, dan 27J berturut-turut ialah 5.53 kN, 7,56 kN, dan 9.75 kN. Semakin besar energi impact semakin besar nilai *max impact force*, dan pada keseluruhan grafik pada kondisi respon gaya sampai dengan kondisi puncak memiliki korelasi yang sangat baik. Tetapi setelah impact maksimum respon yang dihasilkan sedikit berbeda.



**Gambar 3.4** Kurva gaya terhadap waktu dengan element split dengan variasi energi

Pada **Gambar 3.5** menunjukkan respon dinamik uji impact pelat komposit gaya terhadap perpindahan. Dari hasil grafik menunjukkan penggunaan *element split* memberikan respon yang lebih baik antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen. Nilai perpindahan maksimum pada setiap energi energi 7J, 17J, dan 27J berturut-turut ialah 2.53 mm, 4.02 kN, dan 5.94 mm. Nilai maksimum perpindahan hasil simulasi pada energi 7J dan 17 J memberikan nilai yang cukup dekat dengan eksperimen, tetapi sedikit berbeda pada 27J yang nilai memiliki deviasi yang lebih besar dengan hasil eksperimen.

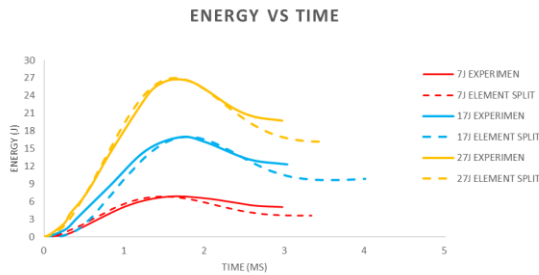


**Gambar 3.5** Kurva gaya terhadap perpindahan dengan element split dengan variasi energi

Pada **Gambar 3.6** menunjukkan hasil perbandingan grafik energi terhadap waktu pada model simulasi dengan *element split* dengan hasil eksperimen. Dari grafik dapat dilihat penggunaan *element split* memberikan korelasi yang baik antara simulasi dan eksperimen. Nilai maksimum energi yang terjadi pada setiap kasus variasi energi impact menghasilkan nilai yang cukup mirip. Respon energi setelah maksimum energi terjadi kemudian respon energi berbeda antara simulasi dan eksperimen.

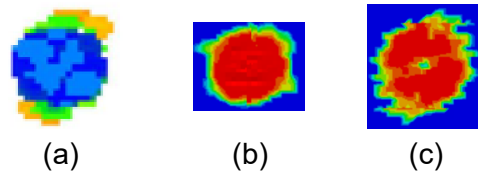
Hal ini dapat memberikan penjelasan bahwa kondisi sangat mirip terjadi pada saat sebelum mencapai puncak, tetapi ketika terjadi *rebound* maka dapat terjadi perbedaan hasil. Secara detail persentase perbedaan hasil simulasi dengan menggunakan *element split* dengan hasil eksperimen ditunjukkan pada **Tabel 3.2**. *Element Split* terbukti dapat mengembangkan model simulasi impact

pelat komposit terhadap beban *Low-Velocity Impact*.



**Gambar 3.6** Kurva energi terhadap waktu dengan element split dengan variasi energi

Pada **Gambar 3.7** menunjukkan perbandingan tampilan kerusakan delaminasi pada eksperimen, model tanpa *element split*, dan dengan *element split*. Dari hasil gambaran terlihat model dengan *element split* dapat memberikan citra kerusakan yang lebih dekat dengan hasil eksperimen. Kerusakan yang terjadi juga lebih luas dibandingkan tanpa *element split*.



**Gambar 3.7** delaminasi dari hasil (a) eksperimen (b) Simulasi tanpa *element split* (c) simulasi dengan *element split*

Dengan adanya model *element split* retakan pada matriks dapat terjadi pada simulasi kemudian retakan tersebut akan merambat pada daerah interlaminar. Hal ini menyebabkan kerusakan delaminasi akan lebih besar karena terpengaruh juga oleh rambatan retak tersebut. Sedangkan pada model tanpa *element split* kerusakan delaminasi hanya dipengaruhi oleh perbedaan kekakuan *bending* pada setiap lapisan komposit tanpa adanya pengaruh tambahan dari retak pada matriks. Oleh karena itu luas delaminasi yang terjadi akan lebih kecil dibandingkan dengan *element split*.

**Tabel 3.2** Perbandingan hasil eksperimen dan simulasi dengan *element split*

Perbandingan	MENGUNAKAN ELEMENT SPLIT								
	7J			17J			27J		
	Eksperimen	Simulasi	Errorr(%)	Eksperimen	Simulasi	Errorr(%)	Eksperimen	Simulasi	Errorr(%)
Max Impact Load (kN)	5.19	5.53	6.55	7.42	7.56	1.89	9.62	9.75	1.35
Time at the max load (ms)	1.36	1.29	-5.15	1.35	1.20	-11.11	1.48	1.39	-6.08
Impact duration (ms)	2.97	3.29	10.77	3.02	3.46	14.57	2.88	3.29	14.24
Max displacement (mm)	2.5	2.53	1.20	4.06	4.02	-0.99	4.99	5.94	19.04
Absorted Impact energy (J)	6.79	6.89	1.47	16.99	19.99	17.66	26.74	26.99	0.93
Residual displacement	1.47	0.24	-83.67	2.22	0.67	-69.82	2.71	0.01	-99.63

#### IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian Analisis Kerusakan Pelat Komposit Akibat Beban Low Velocity Impact Terhadap Variasi Energi Impak Dengan Menggunakan Element Split didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Simulasi *Low-Velocity Impact* menghasilkan respon yang sedikit berbeda dengan eksperimen dikarenakan pada model tidak ada penggambaran retakan pada daerah intralaminar, dan *element split* dapat mengembangkan model tersebut.

2. Penggunaan *Element Split* dapat meningkatkan akurasi simulasi pada respon dinamik dan juga kerusakan delaminasi.
3. Model ini masih memiliki kekurangan karena pembuatan *element split* masih dilakukan secara manual dan jumlah *element split* yang diberikan dapat memberikan respon dinamik dan delaminasi yang sedikit berbeda.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Feng and F. Aymerich, "Finite element modelling of damage induced by low-velocity impact on composite laminates," *Compos Struct*, vol. 108, no. 1, 2014, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.09.004.
- [2] W. Zhuang, P. Wang, W. Ao, and G. Chen, "Experiment and Simulation of Impact Response of Woven CFRP Laminates with Different Stacking Angles," *J Shanghai Jiaotong Univ Sci*, vol. 26, no. 2, pp. 218–230, Apr. 2021, doi: 10.1007/s12204-021-2271-y.
- [3] B. Liao *et al.*, "Effect of double impact positions on the low velocity impact behaviors and damage interference mechanism for composite laminates," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 136, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105964.
- [4] A. Sasikumar, D. Trias, J. Costa, N. Blanco, J. Orr, and P. Linde, "Effect of ply thickness and ply level hybridization on the compression after impact strength of thin laminates," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 121, pp. 232–243, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.03.022.
- [5] J. Bachmann, C. Hidalgo, and S. Bricout, "Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review," *Sci China Technol Sci*, vol. 60, no. 9, pp. 1301–1317, 2017, doi: 10.1007/s11431-016-9094-y.
- [6] A. S. Al Omari, K. S. Al-Athel, A. F. M. Arif, and F. A. Al-Sulaiman, "Experimental and computational analysis of low-velocity impact on carbon-, glass- and mixed-fiber composite plates," *Journal of Composites Science*, vol. 4, no. 4, 2020, doi: 10.3390/jcs4040148.
- [7] H. Cao *et al.*, "Experimental investigation of impactor diameter effect on low-velocity impact response of CFRP laminates in a drop-weight impact event," *Materials*, vol. 13, no. 18, Sep. 2020, doi: 10.3390/ma13184131.
- [8] X. C. Sun, M. R. Wisnom, and S. R. Hallett, "Interaction of inter- and intralaminar damage in scaled quasi-static indentation tests: Part 2 - Numerical simulation," *Compos Struct*, vol. 136, pp. 727–742, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.09.062.
- [9] B. Liao *et al.*, "An explicit–implicit combined model for predicting residual strength of composite cylinders subjected to low velocity impact," *Compos Struct*, vol. 247, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112450.
- [10] Z. Hashin, "Fatigue failure criteria for unidirectional fiber composites," *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, vol. 48, no. 4, pp. 846–852, 1981, doi: 10.1115/1.3157744.
- [11] Z. Hashin and A. Rotem, "A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials," *J Compos Mater*, vol. 7, no. 4, pp. 448–464, 1973, doi: 10.1177/002199837300700404.
- [12] P. P. Camanho and F. L. Matthews, "A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates," *J Compos Mater*, vol. 33, no. 24, pp. 2248–2280, 1999, doi: 10.1177/002199839903302402.