Muhammad Syaiful Fadly

Mahasiswa S2
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
muhsyaifulfadly@gmail.com

Anindito Purnowidodo

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
anindito@ub.ac.id

Putu Hadi Setyarini

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
putu_hadi@ub.ac.id

KARAKTERISTIK *FIBER METAL LAMINATE* AKIBAT BEBAN IMPAK BALISTIK DARI PELURU KALIBER 9 MM *FULL METAL JACKET (FMJ)*

Estimated damage levels from ballistics impact zone provide valuable information to make bulletproof materials more effective. Therefore, this study aims to determine the impact of ballistics including hole shape, hole depth, macro, and microstructure on fiber metal laminate. The characteristics of ballistics impact for each configuration target is obtained from experiment and comparison based on simulations with finite element method. Test experiments used short-barreled fire guns at a distance of 5 meters with a normal attack angle based on the National Institute of Justice standard. Simulation with Johnson-Cook plasticity models for aluminum plate and orthotropic material model for kevlar/epoxy. The experiment and simulation results showed that the projectile is able to perforate the first layer (aluminum plate) and the second layer (Kevlar/epoxy) while the last layer (backplate) is deformed to form a bulge. The aluminum plate is perforated by the failure of petaling formation on the backside and spread of dimple fracture around the area of the petal which indicates ductile fracture while kevlar/epoxy is perforated by projectile with failure of fiber fracture on primary yarn, fiber pull-out, fiber stretching and fiber rupture.

Keywords : *Ballistics, Fiber Metal Laminate, Johnson-Cook Plasticity, Orthotropic, Experiment, Simulation*

1. PENDAHULUAN

Material tahan peluru mempunyai peranan sangat penting sebagai alat pendukung militer dalam rangka tugas operasi dibidang pertahanan dan keamanan. Investigasi perilaku dari bahan akibat beban impak balistik sangat penting ketika merancang material armor atau material tahan peluru yang lebih baik. Perkembangan teknologi persenjataan selama beberapa tahun terakhir sejak tahun 2012–sekarang semakin meningkat dan semakin lebih canggih. Perkembangan tersebut menyebabkan performa dari perlengkapan perlindungan yang dibutuhkan juga menjadi lebih tinggi yaitu untuk menahan kecepatan peluru dengan jangkauan 59-500 m/s [1].

Dewasa ini pengembangan material rompi anti peluru (*body armour*) telah banyak ditemukan melalui penemuan material baru, pemaduan komposisi dan pembuatan komposit baik dari bahan logam maupun keramik dan polimer yang diperkuat serat atau partikel. Pengembangan bahan seperti *carbon nanotube* [2] dan *graphene* [3]. Komposit berlapis biasanya digunakan pada aplikasi beban dinamis dimana komponen matriksnya adalah logam ringan (Al, Mg, atau paduan Ti) dan komponen penguatnya adalah serat. Komposit laminasi logam (*fiber metal laminate*) telah banyak digunakan dalam aplikasi struktur utama pesawat, karena memiliki desain struktur yang ringan dan sifat mekaniknya yang tinggi dibandingkan logam struktur monolitik [4]. Manufaktur berlapis dari *fiber metal laminate* menyebabkan salah satu kegagalan yang terjadi adalah delaminasi [5].

Fenomena penetrasi dari peluru terhadap material *armour* selain dipengaruhi oleh banyak faktor seperti kecepatan peluru, sudut tembakan, jenis dan bentuk peluru yang digunakan, juga dipengaruhi oleh ketebalan material [6]. Ketahanan terhadap balistik semakin meningkat dengan meningkatnya ketebalan material, akan tetapi meningkatnya ketebalan material mempengaruhi bobot material yang semakin berat. Salah satu alat perlindungan yang sering digunakan dalam pelaksanaan tugas-tugas penyamaran, atau

pengamanan bagi personel intelijen yaitu *soft body armour* [7]. *Soft body armour* umumnya menggunakan lapisan tunggal serat kevlar (*aramid*) untuk melindungi dari serangan peluru hingga standard tingkat III-A [8]. Penetrasi dari peluru menyebabkan kevlar mengalami deformasi yang menekan kearah dalam (*shock wave*) pada saat menyerap laju energi peluru. Deformasi kearah dalam searah dengan penetrasi dari peluru ini akan menimbulkan regangan yang besar sampai batas tertentu sebelum kevlar mengalami kegagalan [9].

Soft body armour pada kondisi ideal harus seefektif dan seringan mungkin sehingga tidak mempengaruhi mobilitas penggunanya. Kevlar dapat digabungkan dengan bahan lain dalam bentuk komposit laminat/berlapis untuk meningkatkan ketahanan balistiknya. Perpaduan antara plat aluminium yang memiliki kekuatan dan ketahanan impact yang baik serta kepadatan (*density*) yang rendah [10] dengan komposit kevlar/*epoxy* memiliki struktur yang kuat, sifat peredam yang baik (*vibration damping*), dan ketahanan tinggi terhadap beban dinamis [11] dalam bentuk berlapis *fiber metal laminate* (FML) dapat dilakukan sebagai pembuatan material tahan peluru.

2. METODE DAN BAHAN

2.1 Karakterisasi Kekuatan Bahan

Karakteristik plat Al-5083, kevlar/*epoxy* dan FML diukur melalui uji tarik. Spesimen uji tarik dibuat berdasarkan standard ASTM D-638-03 seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Kekuatan tarik digunakan sebagai data masukan pemodelan simulasi.

Gambar 1: Spesimen uji tarik standard ASTM D-638-03. (a) plat Al-5083 (b) kevlar/*epoxy* (c) FML

Mesin uji tarik yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Universal testing Machine (UTM)* merk *Tarno Grocki* dengan pembebanan maksimum 200 KN. Spesimen harus dicekam dengan kuat agar tidak terjadi slip.

2.2 Pengujian Balistik

Dalam penelitian ini, karakteristik dari FML akibat beban impact balistik dilakukan dengan pengujian secara eksperimen dan simulasi berbasis elemen hingga. FML dibuat dengan konfigurasi tiga lapisan (*triple layered*) terdiri dari dua lembar plat Al-5083 pada permukaan luar dan kevlar/*epoxy* sebanyak empat layer sebagai inti (*core*). Pembuatan spesimen dengan menggunakan metode *vacuum-assisted resin infusion* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2 sedangkan hasil dari proses pembuatan spesimen diperlihatkan pada Gambar 3.

Gambar 2: Proses pembuatan spesimen dengan metode *vacuum-assisted resin infusion*. (a) kevlar/*epoxy* (b) FML

Gambar 3: Hasil pembuatan spesimen. (a) kevlar/epoxy (b) FML (c) konfigurasi FML

Pengujian balistik secara eksperimen dilakukan sesuai dengan standard level dari *National Institute of Justice* (NIJ Standard 0101.06 level III-A) menggunakan senjata pistol metrillo dengan peluru bentuk hidung *hemispherical* kaliber 9 mm *full metal jacket* (FMJ) seperti diperlihatkan pada Gambar 4, dengan inti timah bermantel kuning dan kecepatan peluru 426 m/s dari hasil pengukuran dengan *chronograph*. Jarak tembak yaitu 5 m dan sudut serang normal (90° terhadap target sampel).

Gambar 4: Geometri dan dimensi peluru kaliber 9 mm *full metal jacket* (FMJ)

Skema pengujian balistik ditampilkan pada Gambar 5. Spesimen *holder* digunakan sebagai tumpuan target *fiber metal laminate* pada saat pengujian balistik agar tidak bergerak atau goyang ketika penetrasi dengan peluru. Spesimen holder dan detail tumpuan pada pengujian balistik seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

Gambar 5: Skema pengujian balistik sesuai NIJ Standard 0101.06 level III-A

Gambar 6: Spesimen holder & detail tumpuan pada pengujian balistik.

Simulasi berbasis elemen hingga (*explicit dynamics*) dilakukan dengan menggunakan *software ansys 18.1 workbench*. Geometri model dari peluru dan *fiber metal laminate* dibuat sama sesuai dengan pengujian eksperimen. Nilai *properties* dari masing-masing material menjadi data *input* ke dalam *engineering data*. Pemodelan untuk material elastis dan plastis digunakan dalam simulasi. Model material elastis dianggap linear dan dipengaruhi oleh modulus elastis dan *poisson ratio* sedangkan model material plastis dan kriteria kegagalan material yang digunakan dalam simulasi menggunakan model Johnson-Cook untuk material logam [12]. Peluru dan plat aluminium menggunakan model plastisitas Johnson-Cook seperti pada persamaan 1.

$$\sigma_{eq} = (A + B \epsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right) \quad (1)$$

dengan:

- σ_{eq} = Equivalent stress (MPa)
- A = Yield stress constant (MPa)
- B = Hardening constant
- ϵ = Equivalent strain
- C = Strain rate constant
- N = Hardening exponent
- m = Thermal softening exponent
- $\dot{\epsilon}$ = Strain rate uji (s^{-1})
- ϵ_0 = Reference strain rate (s^{-1})
- T = Temperatur uji/material (K)
- T_r = Temperatur ruang (K)
- T_m = Temperatur leleh material (K)

Kriteria kegagalan material diprediksi oleh Johnson-Cook dengan model kerusakan (*damage model*). Kriteria ini menentukan regangan *equivalent* (ϵ^{pl}) pada awal kerusakan seperti yang dinyatakan dalam persamaan 2 berikut [13] :

$$\epsilon^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{p}{q}\right)\right] \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\epsilon_0}\right)\right] \quad (2)$$

dengan:

- ϵ^{pl} = Regangan plastik *equivalent*
- d_1 - d_4 = Parameter kegagalan
- P = Pressure stress (MPa)
- q = Mises stress (MPa)
- $\dot{\epsilon}^{pl}$ = Plastic strain rate (s^{-1})
- ϵ_0 = Reference strain rate (s^{-1})

Kevlar/epoxy dimodelkan dengan model material orthotropik, jika material memiliki tiga bidang tegak lurus yang simetri, maka matriks kekakuannya ditunjukkan seperti pada persamaan 3 [14] dan hubungan regangan-tegangannya yaitu dengan invers matriks $[C_{ij}]$ sehingga menjadi $[S_{ij}]$ seperti pada persamaan 4 [15].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Kriteria kegagalan yang digunakan pada kelar/*epoxy* yaitu kriteria kegagalan Hashin. Mode kegagalan yang termasuk dalam kriteria Hashin yaitu kegagalan serat di bawah tegangan tarik seperti ditunjukkan pada persamaan 5 dan kegagalan serat akibat kompresi pada persamaan 6 [16].

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right) + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failure} \\ < 0 & \text{no failure} \end{cases} \quad (5)$$

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failure} \\ < 0 & \text{no failure} \end{cases} \quad (6)$$

dengan:

- X_t = Longitudinal tensile (MPa)
- X_c = Compressive strength (MPa)
- S_c = Shear strength (MPa)

Nilai β pada persamaan 5 adalah = 0 sedangkan untuk kegagalan matrik akibat tegangan dan kompresi seperti pada persamaan 7.

$$e_{md}^2 = \frac{\sigma_{22}^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t) \sigma_{22}}{Y_c Y_t} - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failure} \\ < 0 & \text{no failure} \end{cases} \quad (7)$$

dengan:

- Y_c = Compressive strength uji (MPa)
- Y_t = Tensile strength uji (MPa)
- S_c = Shear strength uji (MPa)

Simbol (σ_{ij}) menunjukkan komponen tegangan yang diijinkan untuk lamina. Simbol c dan t merupakan kuat tekan (*compressive*) dan kuat tarik (*tensile*). Meshing pada *fiber metal laminate* dan peluru seperti diperlihatkan pada Gambar 7.

Gambar 7: Hasil pemilihan *meshing*

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Kekuatan Tarik Bahan

Karakteristik dari masing – masing bahan penyusun *fiber metal laminate* (FML) dilakukan dengan pengujian tarik untuk mengetahui kemampuan dari bahan untuk menahan beban dan hubungan kekuatan bahan dengan ketahanan terhadap beban impak balistik.

Gambar 8: Grafik hubungan tegangan-regangan dari plat Al-5083, kevlar/epoxy dan *fiber metal laminate* (FML)

Gambar 8 memperlihatkan bahwa kekuatan tertinggi dari bahan penyusun *fiber metal laminate* (FML) yaitu pada serat kevlar/epoxy kemudian diikuti oleh FML dan plat Al-5083. Kevlar/epoxy dapat menahan beban yang besar akan tetapi dengan elongasi yang kecil yaitu sebesar 1,74% sedangkan untuk plat Al-5083 dengan elongasi sebesar 7,94%. FML menggabungkan keunggulan dari plat Al-5083 dan kevlar/epoxy menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi dari Al-5083 dan elongasi yang lebih besar dari kevlar/epoxy. Kegagalan pada FML diperlihatkan pada Gambar 9.

Gambar 9: Foto makro patahan FML

Salah satu faktor yang mempengaruhi kekuatan tarik dari FML adalah ikatan antara masing-masing lapisan. Gambar 9 memperlihatkan terjadinya delaminasi akibat beban yang diberikan pada spesimen sehingga menyebabkan lapisan antara plat Al-5083 dan kevlar/epoxy terpisah. Beban tidak secara bersamaan ditahan oleh masing-masing lapisan sehingga lapisan Al bagian atas lebih dulu patah kemudian beban selanjutnya ditanggung oleh kevlar/epoxy dan lapisan Al bawah. Hal inilah yang menyebabkan nilai modulus elastisitas FML lebih rendah. Pendekatan hasil uji tarik eksperimen dengan model material Johnson-Cook dari plat Al-5083 seperti diperlihatkan pada Gambar 10.

Gambar 10: Kurva tegangan-regangan perbandingan lima data material terhadap hasil uji tarik

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa tegangan *equivalent* material Al-5083 (1) lebih mendekati dari nilai tegangan-regangan pengujian tarik secara eksperimen dari sampel. Sehingga dalam proses analisis, data material Al-5083 (1) digunakan dalam pengujian balistik secara simulasi numerik seperti yang diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1: Data material plat Al5083 berdasarkan model Johnson-Cook

MATERIAL	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	T _m (K)	T _r (K)	ε ₀ (s ⁻¹)
Al-5083	167	596	0.551	0.001	0.859	893	293	1

3.2 Hasil Pengujian Balistik

a. Plat Aluminium 5083 Tunggal (Al-5083)

Penetrasi peluru pada target plat Al-5083 tunggal menyebabkan dampak kerusakan pada material target. Salah satu parameter yang digunakan untuk melihat ketahanan balistik atau kemampuan material untuk menahan beban balistik yaitu deformasi yang timbulkan peluru saat penetrasi pada material target. Hasil pengujian balistik plat Al-5083 seperti ditunjukkan pada Gambar 11.

Gambar 11: Foto makro dampak balistik plat Al-5083. (a) sisi depan (b) sisi belakang (c) penampang melintang

Gambar 11 memperlihatkan dampak balistik plat Al-5083 akibat penetrasi dari peluru. Deformasi terbentuk pada daerah dampak peluru dan menjauh dari daerah dampak. Karakter lubang dari plat Al-5083 tampak patahan disekeliling bibir lubang pada bagian sisi belakang. Diameter lubang pada sisi depan dan belakang memiliki ukuran yang hampir sama. Sisi depan tampak diameter lubang yang terdorong kedepan sesuai arah peluru sedangkan sisi belakang tampak terbentuknya patahan bibir seperti kelopak. Terbentuknya patahan seperti kelopak dan deformasi pada bagian sisi belakang menunjukkan bahwa plat bersifat ulet dan lunak sehingga menyebabkan peluru melubangi material dengan deformasi plastis, target terdorong kedepan saat peluru melubangi target. Karakteristik kegagalan material akibat penetrasi dari peluru adalah kegagalan *petaling* (kelopak) dan pembentukan lubang ulet.

Gambar 12: Distribusi *equivalent stress* dan kecepatan sisa dari peluru pada plat Al-5083 tunggal

Gambar 12 memperlihatkan dampak dimulai pada $t = 6,5135 \times 10^{-6} \text{ s}$ ketika peluru pertama kali penetrasi pada target. Konsentrasi tegangan terjadi pada peluru dan plat di daerah zona dampak sehingga mengalami deformasi, kecepatan peluru yang awalnya 426 m/s mengalami penurunan pada waktu tersebut menjadi 413,96 m/s. Plat Al-5083 tunggal tidak mampu menahan laju peluru sehingga plat terlubangi pada waktu $t = 5,201 \times 10^{-5} \text{ s}$. Konsentrasi tegangan pada peluru yaitu pada mantel peluru (kuningan) yang menyebabkan mantel peluru hancur atau mengalami kegagalan saat penetrasi. Tegangan maksimum terjadi pada plat yang ditunjukkan dengan warna merah sedangkan inti peluru (timah) distribusi tegangan yang terjadi rendah, ditunjukkan dengan warna biru. Hal inilah yang menyebabkan penetrasi peluru pada plat Al-5083 tunggal menjadi lebih dalam sehingga menembus plat.

b. Kevlar/Epoxy

Karakter makroskopik pada kevlar/*epoxy* akibat beban impact balistik dari peluru kaliber 9 mm FMJ seperti ditunjukkan pada Gambar 13.

Gambar 13: Foto makro dampak balistik kevlar/*epoxy*. (a) sisi depan (b) detail benang primer dan sekunder dari serat

Gambar 13 menunjukkan spesimen kevlar/*epoxy* yang mengalami kerusakan dan ditembus oleh peluru setelah dampak balistik. Kerusakan pada benang primer yang disebabkan serat tidak mampu menahan kecepatan dari peluru sehingga terputus dan daerah disekitar dampak juga tampak mengalami delaminasi

serta retakan pada matriks *epoxy*. Benang yang bersentuhan langsung dengan peluru disebut benang primer (utama) sedangkan benang yang tidak bersentuhan langsung disebut benang sekunder seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14. Selama peristiwa dampak, peluru menciptakan defleksi melintang pada benang primer, sedangkan gelombang longitudinal juga merambat menjauh dari titik dampak di sepanjang sumbu benang primer dengan kecepatan yang sangat tinggi.

Gambar 14: Hasil dampak balistik eksperimen dan simulasi kevlar/*epoxy* 4 layer bagian sisi depan

c. Fiber Metal Laminate (FML)

Respon material target akibat beban impact balistik dari peluru dipengaruhi oleh sifat mekanik target seperti kekerasan, kekuatan dan keuletan. Kombinasi dari kekuatan dan keuletan dapat meningkatkan kemampuan material ketika menahan laju dari peluru. Peluru merusak target sasaran akibat energi kinetik yang dimilikinya, ketahanan balistik dari suatu material target memenuhi persyaratan apabila peluru mengalami penetrasi sebagian (*partial penetration*) namun tidak sampai tertembus sehingga material target mengalami deformasi [7]. Karakter makroskopik dari FML akibat beban impact balistik peluru kaliber 9 mm FMJ seperti ditunjukkan pada Gambar 15. Dampak balistik pada bagian sisi depan dari FML tampak seperti membentuk sebuah kawah sehingga menghasilkan kedalaman lubang penetrasi dari peluru. Peluru tidak mampu menembus FML sehingga peluru terdeformasi akan tetapi pada bagian sisi belakang FML membentuk tonjolan (*bulge*).

Gambar 15: Foto makro dampak balistik FML. (a) sisi depan (b) sisi belakang (c) penampang melintang

Gambar 15 (a) memperlihatkan pembentukan kawah dengan adanya retakan pada dinding kawah akibat penetrasi dari peluru. Akibat penetrasi dari peluru menyebabkan lapisan pertama yaitu plat Al-5083 dan lapisan kedua yaitu kevlar/epoxy tertembus sedangkan lapisan terakhir terdeformasi membentuk sebuah tonjolan (*bulge*). Kegagalan lapisan pertama diakibatkan pembentukan lubang ulet akibat deformasi plastis dari peluru sedangkan kegagalan lapisan kedua (kevlar/epoxy) akibat kegagalan serat yang mengalami beban kompresi dari peluru sehingga serat terputus. Diameter lubang akibat penetrasi peluru pada sisi permukaan lapisan pertama lebih besar dibandingkan dengan diameter sisi dalam seperti pada Gambar 15 (c). Kegagalan FML juga diakibatkan adanya delaminasi yaitu berpisahannya antar lapisan plat aluminium dan kevlar/epoxy. Hal ini disebabkan karena tumbukan dari peluru pada masing-masing lapisan menyebabkan lapisan tertarik pada daerah yang kontak langsung dengan peluru sehingga membuat antar lapisan terkelupas.

Gambar 16: Distribusi *equivalent stress* dan kecepatan sisa dari peluru pada FML

Penetrasi awal peluru pada lapisan pertama yaitu plat Al-5083 terjadi pada waktu $t = 1,5005 \times 10^{-5}$ s. Manufaktur berlapis dengan ikatan (*bonded*) dari resin *epoxy* dan sifat lapisan dekap (plat Al-5083) yang ulet memberikan efek tegangan maksimum yang langsung terdistribusi ke seluruh lapisan dari FML. Ujung peluru terus menusuk lapisan pertama yaitu plat Al-5083 sedangkan mantel peluru mulai terdeformasi dan hancur pada waktu $t = 3,002 \times 10^{-5}$ s. Lapisan kedua yaitu kevlar/epoxy dan lapisan ketiga (*backplate*) juga ikut terdorong karena sifat material yang ulet sehingga terjadinya deformasi plastis. Pada waktu ini kecepatan peluru berkurang menjadi 284,69 m/s. Peluru mulai tumpul dan berdeformasi dengan bentuk seperti jamur (*mushroom*) pada waktu $t = 1,05 \times 10^{-4}$ s. Penetrasi pada target berhenti setelah peluru menembus lapisan pertama (plat Al-5083) dan lapisan kedua (kevlar/epoxy) pada waktu $t = 1,2698 \times 10^{-4}$ s. Dalam pemodelan secara *explicit dynamics* pada kontak antara *body* terdapat *breakable stress criteria* dengan memasukkan nilai *normal stress limit* dan *shear stress limit*, tegangan normal dan geser efektif dihitung pada setiap node yang terlibat dalam koneksi terikat (*bonded*). Jika kriteria tersebut terlampaui, node akan terlepas dari kontak yang terikat. Kriteria kegagalan delaminasi diberikan oleh persamaan berikut [17] :

$$f_{del} = \left(\frac{\sigma_n}{S_n} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{S_s} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{failure} \\ < 0 & \text{no failure} \end{cases} \quad (8)$$

dengan:

- σ_n = Normal stress pada ikatan (MPa)
- τ = Shear stress pada ikatan (MPa)
- S_n = Normal stress limit (MPa)
- S_s = Shear stress limit (MPa)

Validasi antara uji eksperimen dan simulasi diperlihatkan pada Gambar 17 sedangkan perbandingan deformasi setelah dampak balistik diperlihatkan pada Tabel 2.

Gambar 17: Uji eksperimental dampak balistik dan simulasi FML. (a) Penampang melintang (b) sisi depan (c) sisi belakang.

Tabel 2: Presentase kesalahan dampak balistik secara eksperimen dan simulasi.

Material	Tonjolan (Bulge)		Presentase Kesalahan
	Eksperimen	Simulasi	
Al-5083	Tertembus	Tertembus	0 %
Kevlar/Epoxy	Tertembus	Tertembus	0 %
Fiber Metal Laminate (FML)	11,758 mm	12,272 mm	4,37 %

3.3 Dampak Balistik Penetrasi dari Peluru

Gambar 18: Korelasi antara waktu penetrasi dengan kecepatan peluru

Kecepatan peluru mengalami penurunan secara bertahap untuk semua konfigurasi. Konfigurasi plat Al-5083 tunggal dan kevlar/epoxy tertembus oleh peluru sehingga menghasilkan kecepatan sisa. Plat Al-5083 tunggal memiliki kecepatan sisa yang lebih kecil dibandingkan kevlar/epoxy. Akan tetapi kevlar/epoxy termasuk memiliki ketahanan balistik yang cukup baik meskipun hanya dengan susunan 4 layer serat dengan ketebalan akhir 1,12 mm menghasilkan kecepatan sisa mendekati plat Al-5083 tunggal dengan ketebalan 2 mm. Hal ini disebabkan karena kevlar/epoxy mampu meredam laju dari peluru dan mendistribusikannya pada penampang kain yang bersentuhan langsung dengan peluru (benang primer) dengan sejumlah deformasi.

Konfigurasi *fiber metal laminate* (FML) memperlihatkan penurunan kecepatan peluru secara bertahap seiring bertambahnya waktu penetrasi. Penetrasi peluru menyebabkan deformasi pada FML, deformasi yang terjadi menyebabkan laju peluru menjadi terhambat dan berhenti dengan kecepatan akhir 0 m/s pada waktu $t = 1,2698 \times 10^{-4}$ s. Peluru berhenti dan berbalik arah ketika telah berhasil menembus lapisan pertama yaitu plat Al-5083 dan lapisan kedua yaitu kevlar/epoxy sehingga menghasilkan nilai negatif. Dampak balistik dari peluru kaliber 9 mm *full metal jacket* (FMJ) menyebabkan material target mengalami kerusakan dan kegagalan. Kegagalan yang terjadi pada plat Al-5083 tunggal seperti ditunjukkan pada Gambar 19.

Gambar 19: Hasil uji SEM morfologi permukaan patahan keluar peluru pada plat Al-5083 tunggal

Lapisan permukaan tampak hancur akibat dari dampak peluru kecepatan tinggi. Fenomena *petaling* atau terbentuknya kelopak juga terlihat pada sisi keluar peluru pada target. Selama peristiwa dampak dan pelubangan target plat di depan peluru didorong keluar secara lateral dengan timbulnya kegagalan dalam hal retakan melingkar dan radial. Hal ini yang menyebabkan terjadinya fenomena *petaling*. Beberapa retakan mikro juga terlihat pada permukaan patahan dan patahan yang mendominasi adalah patah ulet (*ductile fracture*), hal ini terlihat pada Gambar 19 dimana bentuk patahan *dimple* hampir disemua bagian permukaan yang hancur akibat beban dampak balistik.

Gambar 20: Hasil uji SEM kevlar/epoxy setelah dampak balistik

Gambar 20 menunjukkan kerusakan serat dimana serat terputus akibat kompresi dari peluru. Tampak ada permukaan yang retak antara matriks dan serat. Gambar 20 juga memperlihatkan pada daerah dekat dari dampak peluru tampak terjadi kegagalan *fiber pull-out* menyebabkan serat kevlar tertarik keluar dari matriks dan terputus. Namun ada beberapa bagian matriks yang terlihat menempel pada serat di beberapa titik, hal ini menunjukkan bahwa ikatan yang sempurna antarmuka serat dan matriks. Ketika peluru mengenai serat dalam bentuk anyaman, peluru ditangkap oleh lapisan-lapisan anyaman dari serat sehingga energi kinetik ditransfer ke lapisan kain yang luas saat gelombang tegangan menyebar keluar dari titik tumbukan. Sebagian energi

dihilangkan oleh defromasi dan kerusakan serat akibat gesekan yang disebabkan oleh serat maupun dengan peluru. Peluru dengan massa dan kecepatan yang tinggi dapat menembus lapisan kain dan menyebabkan kegagalan.

4. KESIMPULAN

Plat Al-5083 tunggal maupun kevlar/*epoxy* sebagai bahan penyusun FML dapat tertembus oleh peluru dengan karakteristik dampak yang berbeda. Secara makroskopik plat Al tunggal tertembus dengan kegagalan pembentukan kelopak (*petaling*) dibagian sisi belakang serta tersebarnya patahan *dimple* disekitar area kelopak yang menandakan terjadinya patahan ulet ketika diamati secara *microstructure*. Kevlar/*epoxy* tertembus oleh peluru dengan kegagalan *fracture* serat pada benang primer. Secara *microstructure* pada area kegagalan serat tampak terjadinya *fiber pull-out* dan serat yang terputus. Dari hasil simulasi juga dibuktikan bahwa plat Al tunggal tertembus akibat deformasi plastis dan pembentukan lubang ulet. Sedangkan kevlar/*epoxy* terjadi distribusi tegangan pada benang primer dan deformasi bagian sisi belakang ketika menahan laju dari peluru. Penggabungan dua material menjadi satu dalam bentuk laminasi (FML) dapat menahan laju dari peluru dengan menembus lapisan pertama (Plat Al-5083) dan lapisan kedua (kevlar/*epoxy*) sedangkan lapisan terakhir (*backplate*) terdeformasi membentuk tonjolan (*bulge*). Kegagalan FML pada lapisan pertama dan kedua mirip dengan masing-masing penyusun bahan sedangkan untuk manufaktur berlapis dari FML, kegagalan yang terjadi adalah delaminasi antar lapisan disebabkan karena tumbukan dari peluru pada masing-masing lapisan menyebabkan lapisan tertarik pada daerah yang kontak langsung dengan peluru dan mengupas menjauh dari daerah dampak. Hal ini juga dibuktikan dari hasil simulasi yaitu distribusi tegangan pada seluruh lapisan ketika penetrasi awal peluru dan deformasi plastis pada lapisan pertama (Plat Al-5083) akibat tusukan dari hidung peluru sehingga mengalami kegagalan, pada lapisan kedua (kevlar/*epoxy*) terjadinya tegangan maksimum sehingga mengalami kegagalan sedangkan lapisan ketiga (*backplate*) sebagai tumpuan membentuk tonjolan (*bulge*) akibat deformasi plastis yang terjadi dari awal penetrasi

5. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Terima kasih yang tak terhingga dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng sebagai pembimbing I dan Dr. Putu Hadi Setyarini, ST., MT sebagai pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, dorongan, saran dan masukan selama saya menjalani pendidikan dan menyelesaikan penelitian ini, serta terima kasih kepada semua pihak yang namanya tidak dapat saya sebutkan satu-persatu yang telah membantu penulis baik dari segi moril maupun materil hingga selesainya penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] HAZELL, P. J., *Armour materials, theory, and design*, 1 ed., Australia, CRC Press, 2016.
- [2] BILISIK, K., “Two-dimensional (2D) fabrics and three-dimensional (3D) preforms for ballistic and Stabbing protection: A review”, *Textile Research Journal*, v. 87, pp. 2275–2304, November. 2017.
- [3] BENZAIT, Z., & TRABZON, L., “A review of recent research on materials used in polymer–matrix composites for body armor application”, *Journal of Composite Materials*, v. 52, pp. 3241–3263, September. 2018
- [4] OKHAWILAI, M., & RIMDUSIT, S., “Hard armor composites from ballistic fiber-reinforced polybenzoxazine alloys”, *Advanced and Emerging Polybenzoxazine Science and Technology*, v. 15, pp. 699–723, January. 2017.
- [5] FIRMANSYAH, H. I., PURNOWIDODO, A., & SETYABUDI, S. A., “Pengaruh mechanical bonding pada aluminium dengan serat karbon terhadap kekuatan tarik fiber metal laminates”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 9, n. 2, pp. 127–134, 2018.
- [6] YOON, G. H., MO, J. S., KIM, K. H., YOON, C. H., & LIM, N. H., “Investigation of bullet penetration in ballistic gelatin via finite element simulation and experiment”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 29, pp. 3747–3759, September. 2015.
- [7] CROUCH, I. G., *Science of Armour Materials*, 1 ed., United States, Matthew Deans, 2017.
- [8] LOURO, L. H. L., GOMES, A. V., MILANEZI, T. L., BRAGA, F. DE O., MONTEIRO, S. N., & LIMA, É. P., “Ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in multilayered armor systems”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 7, pp.541–549, September. 2018.
- [9] ABTEW, M. A., BOUSSU, F., BRUNIAUX, P., LOGHIN, C., & CRISTIAN, I., “Ballistic impact

- mechanisms-A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses”, *Composite Structures*, v. 223, pp. 1-41, May. 2019.
- [10] SUJITH, N. S., CHETHAN, K. Y., SANDEEP, M. D., SANJAY, M. S., BASHA, S. K., & SOWMYASHREE, D. S., “Impact Analysis of Bullet on Different Bullet Proof Materials”, *International Journal of Mechanical and Industrial Technology*, v. 3, pp. 303-310., September. 2015.
 - [11] MOURITZ, A. P., *Introduction to aerospace materials*, 1 ed., Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2012.
 - [12] RASHED, A., YAZDANI, M., BABALUO, A. A., & HAJIZADEH PARVIN, P., “Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers”, *Journal of Composite Materials*, v. 50, pp. 3561-3576, October. 2016.
 - [13] MUBASHAR, A., UDDIN, E., ANWAR, S., ARIF, N., WAHEED UL HAQ, S., & CHOWDHURY, M. A. K., “Ballistic response of 12.7 mm armour piercing projectile against perforated armour developed from structural steel”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, v. 233, pp. 1993-2005, October. 2018.
 - [14] ZHOU, Y., LI, G., FAN, Q., WANG, Y., ZHENG, H., TAN, L., & XU, X., “Study on protection mechanism of 30CrMnMo-UHMWPE composite armor”, *Materials*, v. 10, pp. 1-12, April. 2017.
 - [15] LIU, T., ZHANG, X., HE, N., & JIA, G., “Numerical material model for composite laminates in high-velocity impact simulation”, *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 14, n. 11, pp. 1912-1931, July. 2017.
 - [16] BRESCIANI, L. M., MANES, A., RUGGIERO, A., IANNITTI, G., & GIGLIO, M., “Experimental tests and numerical modelling of ballistic impacts against kevlar 29 plain-woven fabrics with an epoxy matrix: Macro-homogeneous and Meso-heterogeneous approaches”, *Composites Part B: Engineering*, v. 88, pp. 114-130, March. 2016.
 - [17] NUNES, S. G., SCAZZOSI, R., MANES, A., AMICO, S. C., DE AMORIM JÚNIOR, W. F., & GIGLIO, M., “Influence of projectile and thickness on the ballistic behavior of aramid composites: Experimental and numerical study”, *International Journal of Impact Engineering*, v. 132, pp. 1-13, October.2019.