



Ketahanan balistik plat aluminum berlubang – komposit serat kevlar akibat impak proyektil bentuk *hemispherical*

Ballistic resistance of perforated aluminum plate – kevlar fiber composite due to hemispherical projectile impact

M.S. Fadly*

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Jl. Soekarno Hatta No.KM. 9, Tondo, Kota Palu, Sulawesi Tengah 94148, Indonesia. HP. 082290581320

*E-mail: muhsyaifulfadly@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 27 May 2023

Accepted 06 September 2023

Available online 01 October 2023

Keywords:

Ballistic impact

Perforated plate

Projectile



This study examines the influence of hole diameter on the ballistic resistance of deformable 9 mm full metal jacket (FMJ) calibre projectiles. Both experimental and numerical findings reveal an effective mechanism for overcoming perforated aluminium plate and kevlar fibre composite. The results from experiments and simulations demonstrate that a 3 mm hole diameter can impede the bullet's velocity by penetrating the first and second layers, consequently impacting the back plate that forms a bulge. A hole with a diameter of 5 mm causes projectiles to be perforated with a residual velocity of 20.041 m/s. The 3 mm hole induces a bending effect on the projectile, leading to a deviation from its original trajectory.

Dinamika Teknik Mesin, Vol. 13, No. 2, Oktober 2023, p. ISSN: 2088-088X, e. ISSN: 2502-1729

1. PENDAHULUAN

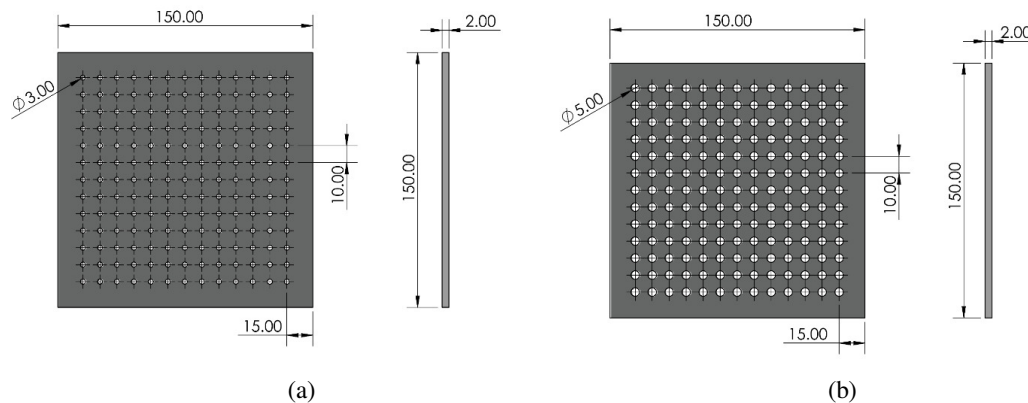
Rompi yang dirancang untuk melindungi pemakainya dari serangan fisik seperti peluru merupakan peralatan yang sangat penting. Rompi semacam itu sering kali digunakan oleh aparat keamanan militer untuk menjaga dan melindungi pasukan mereka agar tidak mengalami luka selama bertugas, Mubashar dkk. (2019). Proses penetrasi proyektil ke dalam material rompi dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk kecepatan peluru, sudut tembakan, jenis dan bentuk peluru yang digunakan, serta ketebalan material rompi, Yoon dkk. (2015). Ketebalan material rompi berperan dalam meningkatkan resistansi balistik, namun penambahan ketebalan material juga berarti peningkatan bobot yang lebih berat.

Dalam beberapa penelitian yang berbeda, ditemukan bahwa performa plat baja dapat ditingkatkan dengan memberikan pola lubang pada permukaan pelat, Balos dkk. (2021), Kılıç dkk. (2014). Lubang-lubang tersebut telah terbukti menghambat penyebaran pita geser adiabatik (ASB) lebih baik daripada pelat yang tidak memiliki lubang, Mishra dkk. (2012). Selain itu, pemberian lubang pada pelat juga memiliki manfaat berupa pengurangan bobot pelat, sehingga dapat meningkatkan kinerja balistik rompi antipeluru tanpa menambah beban berat. Dalam konteks proteksi balistik terhadap peluru berkecepatan tinggi, penggunaan bahan laminasi telah terbukti lebih efektif daripada menggunakan bahan monolitik, Fadly dkk. (2021).

Pengembangan material untuk aplikasi rompi antipeluru dapat mengalami inovasi melalui proses manufaktur, seperti pembuatan komposit dengan penambahan material lain yang memiliki kemampuan meredam yang baik ke dalam logam tersebut. Material berlapis atau sandwich panel merupakan contoh yang menggabungkan keunggulan dua sifat material yang berbeda untuk mengatasi kelemahan masing-masing, Surowska dkk. (2017), Fadly dkk., (2019). Dalam penelitian lain yang ketahanan balistik dapat ditingkatkan dengan menggunakan karet sebagai peredam benturan pada lapisan inti komposit berlapis, sehingga tegangan pada saat penetrasi tidak diteruskan pada lapisan belakang, Bakri dkk. (2023), M S Fadly dkk. (2023). Peningkatan kinerja balistik juga dilakukan dengan memodifikasi struktur tenunan polos. Kinerja balistik dari kain yang dimodifikasi menunjukkan peningkatan batas balistik limit dan energi sebesar 21.7% dan 50%, Zhou dkk. (2022). Penggunaan simulasi numerik juga dilakukan untuk memodelkan plat baja yang terkena impak kecepatan tinggi peluru dengan menggunakan model Mie-Gruneisen dan model material johnson cook, Hao dkk. (2022), Wang dkk. (2023). Untuk meningkatkan kinerja balistik pada material berlapis, lubang-lubang diberikan pada lapisan pertama pelat aluminium, terutama untuk mempelajari pengaruh diameter lubang terhadap ketahanan balistiknya. Simulasi menggunakan metode elemen hingga dilakukan untuk memahami fenomena balistik dan mekanisme kegagalan material yang sulit atau bahkan tidak dapat diperoleh melalui eksperimen. Hasil dari simulasi elemen hingga kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dilakukan. Penggunaan plat berlubang pada lapisan depan dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang tidak menggunakan lubang untuk meningkatkan ketahanan balistik dengan cara merubah lintasan peluru yang masuk atau dialihkan dari lintasan insiden, mengakibatkan penurunan kecepatan peluru secara signifikan.

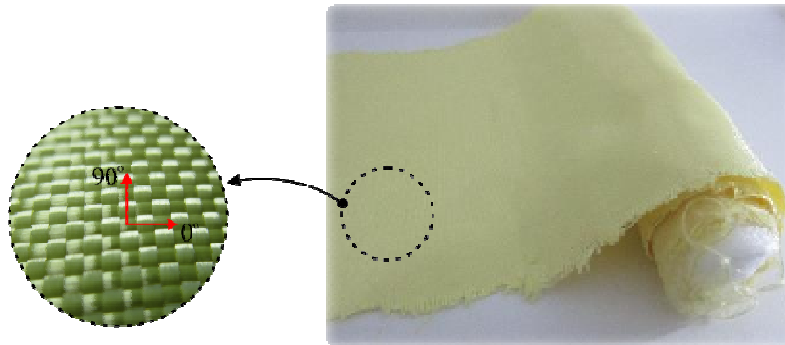
2. METODE PENELITIAN

Pengujian balistik pada material berlapis yang memiliki lubang dilakukan untuk menginvestigasi perilaku penetrasi dengan menggunakan dua diameter lubang yang berbeda. Material berlapis tersebut terdiri dari konfigurasi tiga lapisan, dimana dua lembar pelat Al 5083 dengan ketebalan 2 mm ditempatkan pada permukaan luar, sementara inti terdiri dari empat lapisan kevlar/epoksi. Lubang-lubang diberikan pada lapisan pertama yaitu plat Al 5083 dengan pola lubang bulat di tengah dan variasi diameter lubang sebesar 3 mm dan 5 mm, seperti yang terlihat dalam gambar 1.

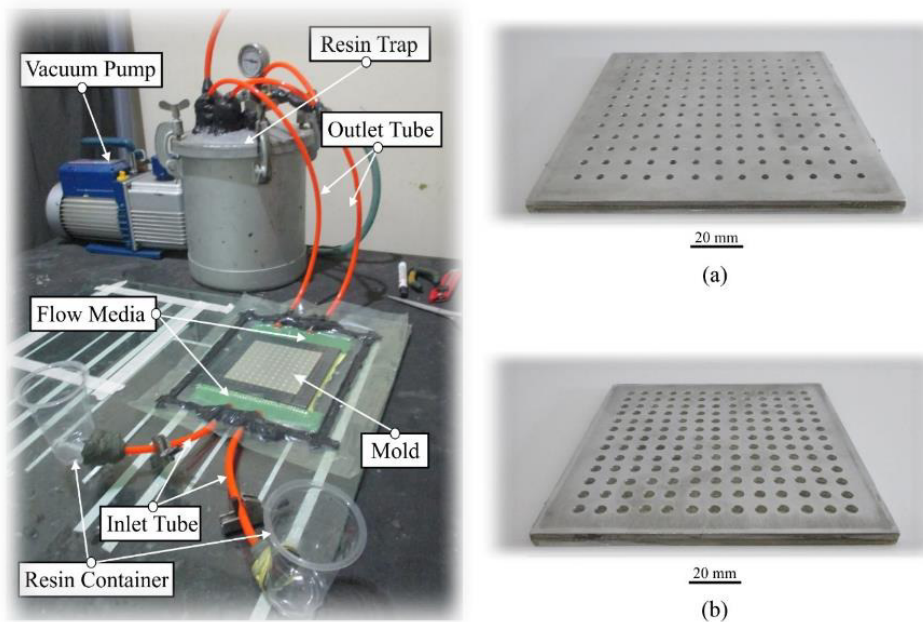


Gambar 1. Desain dan dimensi Al 5083 berlubang (a) lubang 3 mm (b) lubang 5 mm (satuan: mm)

Dalam penelitian ini, serat kevlar yang digunakan adalah dalam bentuk tenunan polos dengan orientasi sudut $0^{\circ}/90^{\circ}$, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2. Material berlapis atau sandwich panel dibuat menggunakan metode infusikan resin yang dibantu dengan pompa vakum seperti pada gambar 3, dengan proses pembuatan dilakukan pada kondisi suhu ruang di laboratorium. Resin epoksi yang digunakan dalam sandwich panel berfungsi sebagai pengikat antara lembaran serat kevlar atau antara lembaran aluminium dan serat kevlar.



Gambar 2. Serat kevlar



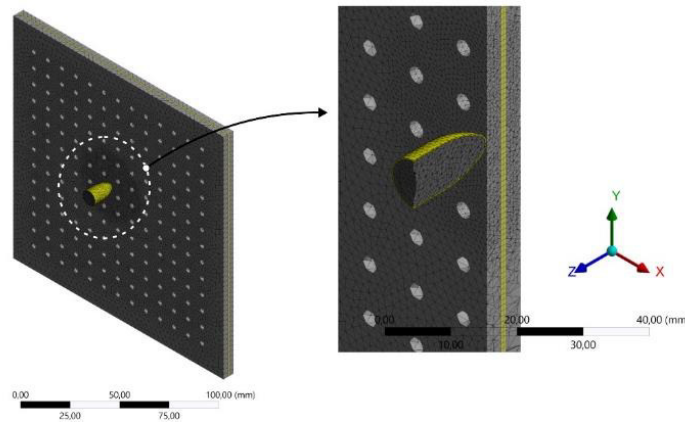
Gambar 3. Infusion resin dengan pompa vakum (a) sandwich panel berlubang 3 mm (b) sandwich panel berlubang 5 mm

Tes balistik eksperimental dilakukan sesuai standar level National Institute of Justice (NIJ Standard 0101.06 level III-A), Roberts dkk. (2007), Development dkk. (1981), Wu dkk. (2020). Tes ini menggunakan pistol metrillo dan peluru berbentuk full metal jacket (FMJ) dengan kaliber 9 mm, yang memiliki inti timah dan mantel kuningan. Kecepatan peluru yang diukur menggunakan chronograph adalah 426 m/s. Jarak tembak yang digunakan adalah 5 m dengan sudut serangan normal (90 derajat terhadap target sampel). Untuk menjaga kestabilan material target yaitu sandwich panel selama uji balistik, digunakan sebuah holder spesimen sebagai sasaran. Proses uji balistik ini dapat dilihat dalam gambar 4.



Gambar 4. Pengujian balistik menurut Standar NIJ 0101.06 level III-A

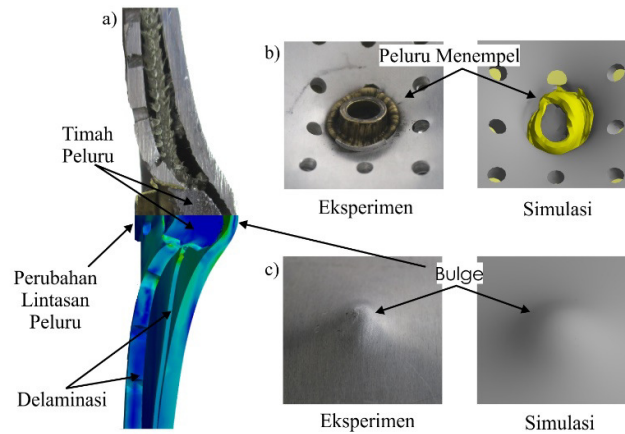
Simulasi numerik dengan pembuatan geometri untuk model peluru dan sandwich panel sesuai dengan model uji eksperimen. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional 2016. Setelah itu, model peluru dan sandwich panel diekspor ke perangkat lunak Ansys 18.1 yang digunakan untuk melakukan simulasi. Pemodelan elastis dan plastik digunakan dalam simulasi, model bahan elastis diasumsikan linier dan dipengaruhi oleh modulus elastis dan poisson rasio, sedangkan model bahan plastik dan kriteria kegagalan bahan yang digunakan dalam simulasi mengacu pada model Johnson-Cook, Rashed dkk. (2016), Johnson (1983), Zhang dkk. (2015). Respon material ini mencerminkan bagaimana bahan menunjukkan kekuatannya saat mengalami regangan yang signifikan, laju regangan yang tinggi, dan suhu yang tinggi. Dalam menggambarkan korelasi Johnson-Cook ini, penting untuk memperhitungkan penguatan regangan, penguatan laju regangan, dan temperature softening, Kumar dkk. (2022), Pandouria & Tiwari. (2023). Pemodelan serat Kevlar dengan menggunakan model material orthotropic, Sahu dkk. (2020). Dalam simulasi dilakukan proses meshing element, tujuan pemilihan meshing adalah untuk mengatur tingkat keakuratan hasil simulasi. Meshing material target dan peluru seperti ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Meshing element

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi dilakukan pada kedua pengujian yaitu eksperimen dan simulasi untuk mengidentifikasi persentase kesalahan antara keduanya. Perbandingan hasil setelah dampak balistik antara pengujian eksperimental dan simulasi numerik dapat dilihat pada gambar 6.



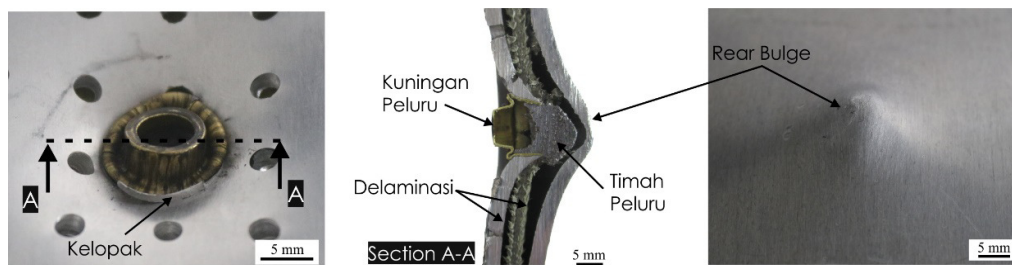
Gambar 6. Perbandingan hasil balistik dengan sandwich panel berlubang diameter 3 mm dalam percobaan eksperimen dan simulasi (a) penampang melintang (b) tampak depan (c) tampak belakang

Hasil uji balistik yang pada gambar 6 menunjukkan adanya kesamaan antara eksperimen dan simulasi. Penampang melintang menggambarkan pelepasan selubung peluru dari inti peluru, serta deviasi arah peluru dari lintasan awalnya, terjadi juga delaminasi antar lapisan, namun perbedaan delaminasi terlihat antara eksperimen dan simulasi. Hal ini disebabkan oleh adanya ikatan yang kuat pada saat pembuatan sampel menggunakan metode infusio resin, sementara dalam simulasi menggunakan data kriteria tekanan ikatan yang diambil dari referensi yang menggunakan jenis resin epoksi yang sama. Bagian depan menunjukkan peluru yang menempel, sementara bagian belakang menunjukkan adanya tonjolan. Hasil pengukuran deformasi setelah dampak balistik dan persentase kesalahan dalam uji eksperimen dan simulasi numerik tercantum dalam tabel 1.

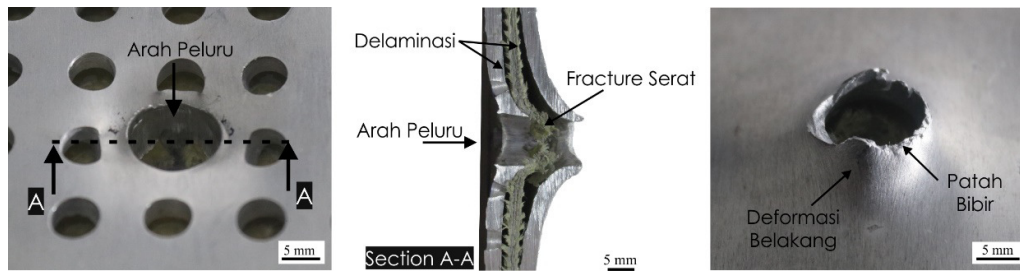
Tabel 1. Perbandingan hasil uji balistik secara eksperimen dan simulasi numerik

Diameter Lubang	Tonjolan		% Kesalahan
	Eksperimental	Simulasi	
3 mm	14,865 mm	15,774 mm	6,11 %
5 mm	Tertembus	Tertembus	0 %

Tabel 1 mengungkapkan bahwa terdapat persentase kesalahan terbesar sebesar 6,11% antara eksperimen dan simulasi untuk benda uji dengan lubang berdiameter 3 mm. Tonjolan yang terjadi dalam simulasi numerik lebih besar daripada dalam eksperimen. Perbedaan ini terlihat dalam perbandingan delaminasi yang terjadi seperti yang terlihat pada gambar 6. Delaminasi dalam simulasi lebih besar daripada dalam eksperimen, yang menyebabkan deformasi atau tonjolan yang lebih besar pada sisi belakang karena tidak terikat antara lapisan terakhir pada lapisan sebelumnya, sehingga memungkinkan lapisan terakhir bergerak lebih bebas. Karakteristik makro dari dampak balistik dapat dilihat dalam gambar 7 dan gambar 8.

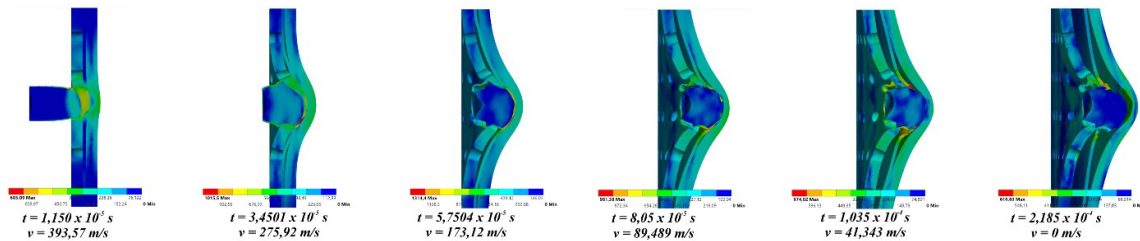


Gambar 7. Impak balistik di lubang 3 mm (a) tampak depan (b) penampang melintang (c) tampak belakang



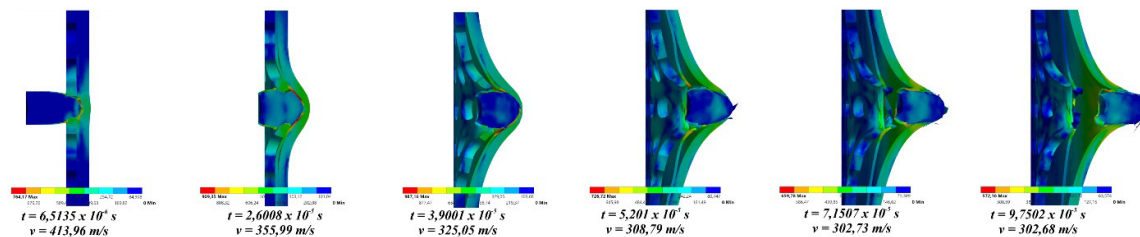
Gambar 8. Impact balistik di lubang 5 mm (a) tampak depan (b) penampang melintang (c) tampak belakang

Gambar 8 dan gambar 9 menunjukkan bahwa lubang berdiameter 3 mm memiliki kemampuan untuk menahan laju peluru dengan cara menembus lapisan pertama (plat Al 5083) dan lapisan kedua (kevlar/epoksi), sementara lapisan terakhir (pelat belakang) mengalami deformasi dan membentuk tonjolan. Di sisi lain, lubang berdiameter 5 mm menyebabkan peluru melubangi dan menghasilkan patahan pada bagian belakang. Patahan pada lapisan belakang terjadi karena deformasi plastis yang tidak mampu ditahan oleh plat, sehingga terjadi patahan yang bersifat lentur atau ulet. Peluru yang berhasil menembus lubang berdiameter 3 mm mengalami perubahan arah, sehingga tonjolan pada pelat belakang tidak simetris antara bagian atas dan bawah titik koordinat peluru. Proses penetrasi peluru selama tumbukan balistik, distribusi tegangan, dan kecepatan sisa peluru terlihat dalam gambar 9 dan gambar 10.



Gambar 9. Proses impact peluru secara simulasi pada sandwich panels dengan lubang 3 mm (equivalent stress-von mises)

Gambar 9 menunjukkan bahwa pada waktu $t = 1.150 \times 10^{-5}$ s terjadi penetrasi awal yang menyebabkan pemusatan tegangan di sekitar area tumbukan peluru. Meskipun demikian, bagian atas peluru masih terlihat menembus lapisan pertama yang tidak mengenai lubang. Kecepatan peluru pada saat itu telah berkurang menjadi 393,57 m/s. Terjadi juga delaminasi akibat kompresi peluru, sehingga lapisan pertama dan kedua terpisah. Meskipun kecepatan peluru masih relatif tinggi, yaitu 173,12 m/s, peluru tetap dapat berhasil menembus lapisan pertama dan kedua pada waktu $t = 8,05 \times 10^{-5}$ s. Pada saat itu, terjadi delaminasi antara lapisan kedua dengan lapisan akhir, dan delaminasi semakin besar karena kecepatan peluru yang mendorong pelat belakang. Adanya lubang pada pelat menghasilkan kekuatan lentur pada peluru dan mengubah arah datangnya peluru pada waktu $t = 8,05 \times 10^{-5}$ s. Selain itu, terjadi pengikisan pada ujung peluru yang mengurangi kemampuan penetrasi. Proses penetrasi peluru berhenti ketika berhasil menembus lapisan pertama dan kedua pada waktu $t = 2,2036 \times 10^{-4}$ s.



Gambar 10. Proses impact peluru secara simulasi pada sandwich panels dengan lubang 5 mm (equivalent stress-von mises)

Gambar 10 menunjukkan bahwa target tidak mampu menahan kecepatan peluru, sehingga peluru berhasil melubangi seluruh lapisan target dengan kecepatan sisa 20,041 m/s pada waktu $2,3 \times 10^{-4}$ detik. Simulasi ini membuktikan bahwa kegagalan terjadi karena posisi penetrasi peluru langsung melalui lubang berdiameter 5 mm, yang tidak menyebabkan penurunan kecepatan peluru yang signifikan. Peluru dapat merusak target karena adanya deformasi plastis pada pelat Al dan kegagalan tarik serat pada kevlar/epoxy.

4. KESIMPULAN

Hasil eksperimen dan simulasi numerik menunjukkan bahwa lubang berdiameter 3 mm memberikan ketahanan balistik yang lebih baik dibandingkan dengan lubang berdiameter 5 mm. Lubang berdiameter 3 mm menghasilkan tonjolan belakang sebesar 15/774 mm secara simulasi dan 14.865 mm secara eksperimen, sedangkan lubang 5 mm tertembus oleh peluru menghasilkan kecepatan sisa. Pengamatan secara simulasi numerik proses penetrasi peluru pada target memperlihatkan bahwa penetrasi pada plat berlubang menyebabkan kekuatan lentur pada peluru dan mengubah arah datangnya peluru. Di sisi lain, terjadi erosi pada ujung peluru, yang mengurangi kemampuan penetrasi peluru sehingga kecepatan peluru mengalami penurunan yang signifikan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis pada kesempatan ini mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu baik berupa materi maupun pikiran sehingga penelitian dan paper ini dapat terselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bakri, B., Fadly, M. S., Anwar, K., Chandrabakty, S., Numerical research on the impacts of composite panel ballistic using perforated plate for combat vehicle, 4th International Seminar on Science and Technology (ISST 2022), 15-25. 2023.
- Balos, S., Howard, D., Brezulianu, A., Zlatanović, L.D., Perforated plate for ballistic protection-A review, *Metals*, 11, 526-533, 2021.
- Development, N. I. of J. (US). O. of, Testing, & Laboratory, L. E. S., Selection and Application Guide to Police Body Armor, US Department of Justice, National Institute of Justice, 1981.
- Fadly, M S, Bakri, B., Anwar, K., Chandrabakty, S., Evaluation of projectile penetration position on perforated plate on ballistic resistance of composite sandwich panels, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1, 1-13, 2023.
- Fadly, M.S., Purnowidodo, A., Setyarini, P. H., Karakteristik fiber metal laminate akibat beban impak balistik dari peluru kaliber 9 mm full metal jacket (FMJ), *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12, 103-116 2021.
- Fadly, Muhammad Syaiful, Purnowidodo, A., & Setyarini, P. H., Deformation and Energy Absorption Of Fiber Metal Laminates (FMLs) After Ballistic Impact Load. *Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta*, 5, 49-58, 2019.
- Hao, W., Zhang, P., Xie, J., Hou, M., Wang, Z., Bai, X., Investigation of impact performance of perforated plates and effects of the perforation arrangement and shape on failure mode, *Engineering Failure Analysis*, 140, 106-112, 2022.
- Johnson, G.R., A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures, *Proc. 7th Inf. Sympo. Ballistics*, 541-547, 1983.
- Kılıç, N., Bedir, S., Erdik, A., Ekici, B., Taşdemirci, A., & Güden, M., Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile, *Materials & Design*, 63, 427-438, 2014.
- Kumar, S., Pandouria, A.K., Chakraborty, P., Tiwari, V., Evaluation of Johnson-Cook failure model for aluminium alloy AA6063-T6, *Society for Experimental Mechanics Annual Conference and Exposition*, 2, 63-70, 2022.
- Mishra, B., Jena, P. K., Ramakrishna, B., Madhu, V., Bhat, T. B., Gupta, N. K., Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic impact behavior and ASB formation of a high strength steel, *International Journal of Impact Engineering*, 44, 17-28, 2012.
- 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*, 10, 1993-2005, 2019.
- Pandouria, A. K., Tiwari, V., Evaluation of modelling parameters for AA2014-T6 in simulating dynamic fracture event, *International Journal of Impact Engineering*, 180, 104-111, 2023.
- Rashed, A., Yazdani, M., Babaluo, A. A., Parvin, H.P., Investigation on high-velocity impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers, *Journal of Composite Materials*, 25, 3561-3576, 2016.

- Roberts, J.C., Ward, E.E., Merkle, A.C., O'Connor, J.V., Assessing behind armor blunt trauma in accordance with the National Institute of Justice Standard for Personal Body Armor Protection using finite element modeling, *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 5, 1127-1133, 2007.
- Sahu, P., Sharma, N., Panda, S. K., Numerical prediction and experimental validation of free vibration responses of hybrid composite (Glass/Carbon/Kevlar) curved panel structure, *Composite Structures*, 241, 112-117, 2020.
- Surowska, B., Jakubczak, P., Bieniaś, J., Structure and chemistry of fiber metal laminates., In *Hybrid Polymer Composite Materials*, 193–234, 2017.
- Wang, Y., Wang, Z., Liang, S., Yao, X., Yang, N., Experimental and numerical study on the failure modes of ship stiffened plate structure under projectile perforation, *International Journal of Impact Engineering*, 178, 104-113, 2023.
- Wu, K.K., Chen, Y.L., Yeh, J.N., Chen, W.L., Lin, C.-S., Ballistic impact performance of SiC ceramic-dyneema fiber composite materials, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1–9, 2020.
- 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*, 29, 3747–3759, 2015.
- Zhang, D.N., Shangguan, Q.Q., Xie, C.J., Liu, F., A modified Johnson–Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 619, 186–194, 2015.
- Zhou, Y., Yao, W., Zhang, Z., Lin, Y., Xiong, Z., Zhao, Y., Wang, M., Ballistic performance of the structure-modified plain weaves with the improved constraint on yarn mobility: Experimental investigation, *Composite Structures*, 280, 114-123, 2022.