

Studi Pengaruh Penambahan 5wt.% dan 10wt.% Serat Pelepah Salak pada Manufaktur Komposit Epoxy berpenguat Serat Kevlar dan Serat Karbon dengan Metode Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) untuk Aplikasi Rompi Tahan Peluru

V.N. Garjati^{1*}, V.Rizkia¹, N.A.Anggraeni¹, Muslimin¹

¹Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Depok, Indonesia

ABSTRAK – Rompi tahan peluru sebagai perlindungan diri personel militer umumnya berbahan dasar komposit berpenguat serat sintesis. Komposit berpenguat serat kevlar dan karbon telah mampu menahan laju penetrasi peluru dan memiliki karakteristik ringan, namun biaya produksi dengan serat sintesis tersebut relatif mahal. Penggunaan material substitusi dari serat alam sangat potensial, dikarenakan jumlah serat alam yang berlimpah, ringan, dan harganya yang relatif murah. Salah satu serat alam yang potensial adalah serat dari pelepah salak. Penelitian ini berfokus pada pengaruh penambahan serat pelepah salak terhadap karakteristik komposit serat Kevlar dan serat karbon, dengan filler SiC dan Al₂O₃. Pembuatan komposit ini dilakukan dengan metode Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM). Terdapat 4 variasi fraksi volume serat dan filler sebagai penguat yang ditambahkan pada komposit ini. Dari hasil pengamatan dengan SEM didapatkan hasil matriks dan penguat sudah terikat dengan baik. Hasil uji balistik menunjukkan seluruh variasi sampel uji dapat menahan laju peluru sehingga tidak tembus. Hasil uji mekanik menunjukkan saat ini penambahan serat pelepah salak belum secara signifikan meningkatkan sifat mekanis komposit tersebut.

Kata kunci: Komposit, serat alam, serat pelepah salak, VARTM, rompi tahan peluru

ABSTRACT – Bulletproof vests as self-protection for military personnel are generally made from synthetic fiber-reinforced composites. Kevlar and carbon fiber reinforced composites have been able to withstand bullet penetration rates and have lightweight characteristics, but production costs with synthetic fibers are relatively expensive. The use of substitute materials from natural fiber is very potential, due to the abundance of natural fiber, lightweight, and relatively cheap price. One of the potential natural fibers is fiber from the salak midrib. This study focused on the effect of adding salak frond fiber on the composite characteristics of Kevlar fiber and carbon fiber, with SiC and Al₂O₃ fillers. The manufacture of this composite is carried out by the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) method. There are 4 variations of fiber volume fractions and fillers as reinforcement added to this composite. From the results of observations with SEM, the results of the matrix and reinforcement are well bound. The ballistic test results show that all variations of test samples can withstand the bullet rate so that it does not penetrate. The results of mechanical tests show that currently the addition of salak frond fiber has not significantly improved the mechanical properties of the composite.

Keyword: Composite, Natural Fiber, Salak Frond Fiber, VARTM, Bulletproof Vests

Dikirim: 24 Juni 2023; Direvisi: 28 November 2023; Diterima: 29 November 2023

PENDAHULUAN

Rompi tahan peluru adalah salah satu alat perlindungan balistik yang paling sering digunakan oleh personel militer. Kemampuan dalam mobilitas tinggi dan efektivitas perlindungan merupakan karakteristik utama yang dibutuhkan dalam penggunaan rompi tahan peluru [1]. Untuk dapat menjalankan fungsinya yaitu menahan penetrasi laju peluru ketika digunakan, pemilihan material yang tepat sebagai material penyusun rompi tahan peluru tersebut sangat penting. Pada awalnya, rompi tahan peluru yang digunakan pada Perang Dunia I & II masih terbuat dari logam. Rompi tersebut memiliki kekurangan yaitu bobotnya yang berat dapat menghalangi mobilitas personel militer [2]. Berkaitan dengan hal tersebut, telah dikembangkan inovasi yaitu rompi anti peluru yang berbahan dasar komposit berpenguat serat sintesis, yaitu serat Kevlar dan karbon.

Penggunaan serat Kevlar dalam komposit memiliki dampak besar pada kekuatan tarik komposit. Sebagai bahan yang sangat kuat dan tahan lama, serat Kevlar telah digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi komposit seperti perahu, pesawat terbang, mobil balap, dan bahkan baju pelindung. Serat Kevlar terkenal karena kekuatannya yang tinggi, kekakuan, dan sifat tahan ausnya. Dalam komposit, serat Kevlar biasanya digunakan sebagai penguat untuk meningkatkan kekuatannya. Ini terjadi karena serat Kevlar mampu menahan gaya tarik yang tinggi, mengurangi risiko kegagalan material dan meningkatkan daya tahan dan keamanan komposit. Dalam proses produksi komposit, serat Kevlar dapat dipadukan dengan bahan dasar lainnya seperti serat karbon atau serat kaca untuk memperkuat komposit secara keseluruhan. [2]

Namun, penggunaan serat Kevlar juga memiliki kelemahan yaitu Serat Kevlar lebih mahal daripada serat lainnya, sehingga membuat biaya produksi komposit menjadi lebih tinggi. Selain itu, serat Kevlar memiliki sifat termal yang berbeda dengan bahan dasar lainnya dalam komposit, sehingga perlu diperhatikan dalam proses desain dan produksi. [2]

Komposit berpenguat serat Kevlar dan karbon telah cukup memenuhi kriteria utama dari rompi anti peluru yang membutuhkan material ringan dan kuat [3,4]. Secara keseluruhan, penggunaan serat Kevlar dalam komposit dapat meningkatkan kekuatan tarik komposit, namun harus dipertimbangkan juga biaya dan sifat termalnya. Dalam penggunaannya, perlu dilakukan perhitungan dan penyesuaian agar penggunaan serat Kevlar dapat memberikan manfaat yang optimal bagi produk komposit yang dihasilkan.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, berbagai penelitian terus dikembangkan dalam upaya mensubstitusi penggunaan serat sintesis dengan serat alam pada komposit, dikarenakan jumlah serat alam yang berlimpah dan harganya yang relatif murah [5–7]. Selain itu, serat alam memiliki berat jenis yang rendah dan sifat mekanis yang cukup baik dalam aplikasi sebagai rompi tahan peluru [8] Ning, H. telah melakukan penelitian mengenai pembuatan komposit polietilen dengan serat kenaf yang dapat memiliki peningkatan kekuatan tarik yang cukup signifikan [9]. A.M.R Azmi telah melakukan uji balistik terhadap material yang sama, namun hasil uji balistik menunjukkan perlu adanya peningkatan kualitas material untuk mampu sepenuhnya menahan penetrasi peluru [10].

Salah satu alternatif serat alam lain yang potensial sebagai substitusi serat sintesis adalah serat yang berasal dari pelepah atau kulit pohon salak. Pohon salak merupakan salah satu tanaman tropis yang ditemukan berlimpah di Indonesia khususnya di Daerah Istimewa Yogyakarta. Berbagai penelitian di Indonesia seperti yang telah dilakukan oleh Yudha, V. dan Liska, T. telah berhasil melakukan isolasi selulosa dari pelepah pohon salak untuk selanjutnya menjadi serat pelepah salak [11,12]. Penelitian lanjutan mengenai pengaruh penambahan serat pelepah salak sebagai penguat pada komposit untuk aplikasi rompi tahan peluru sangat dibutuhkan. Untuk itu, penelitian ini berfokus pada manufaktur dan analisa terhadap komposit resin epoxy berpenguat serat pelepah salak, serat karbon, serat Kevlar menggunakan filler SiC dan Al₂O₃ dengan metode Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM).

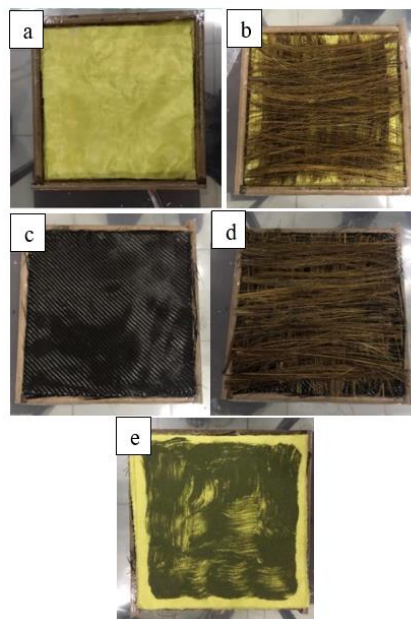
METODE

Pelat komposit dalam penelitian ini diproduksi melalui metode *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM) dengan arah serat simetris [13,14]. Dalam penelitian ini, dilakukan beberapa modifikasi metode

VARTM dengan menambahkan cetakan rigid dibagian atas guna menghasilkan *finishing* permukaan bagian atas yang baik dan mampu memperoleh ketebalan sesuai yang diinginkan dengan tetap menjaga lancarnya distribusi resin ke dalam cetakan. Dimensi cetakan komposit yang digunakan adalah 25 x 25 x 2 cm, 25 x 25 x 0.25 cm, dan 20 x 15 x 1.27 cm. Urutan penyusunan serat secara berturut-turut adalah serat Kevlar dengan filler Al_2O_3 , serat pelepah salak, serat karbon, serat pelepah salak, dan serat Kevlar dengan filler SiC . Adapun 4 (empat) variasi penambahan serat dalam penelitian ini ditunjukkan pada **tabel 1**.

Tabel 1. Variasi Penambahan Serat pada Komposit

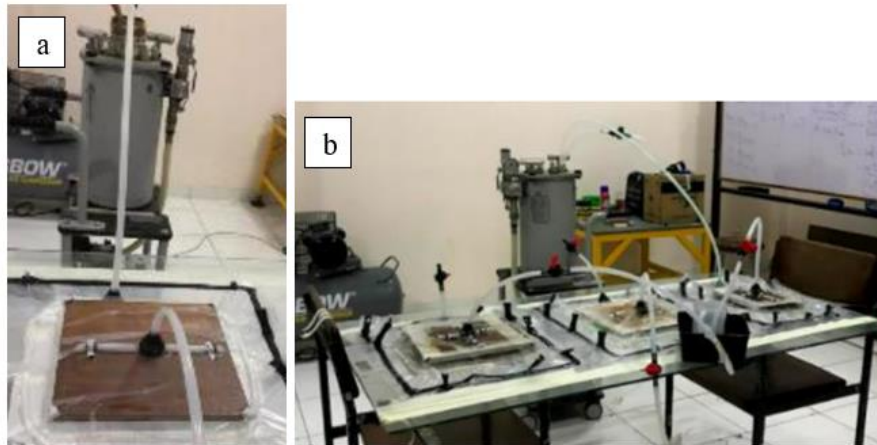
No.	Serat Pelepah Salak (%)	Filler SiC (%)	Filler Al_2O_3 (%)	Serat Karbon (%)	Serat Kevlar (%)
1	10	5	5	10	10
2	5	5	5	10	15
3	2.5	7.5	7.5	2.5	20
4	2.5	5	5	2.5	25



Gambar 1. Tahapan penyusunan serat komposit di cetakan:

(a) serat Kevlar (b) serat pelepah salak (c) serat karbon (d) serat pelepah salak yang kedua, dan (e) serat Kevlar dan filler Al_2O_3 sebagai penutup.

Selanjutnya dilakukan penyemprotan adhesive, lalu semua permukaan laminasi ditutup agar kedap udara. Kemudian resin dialirkan ke dalam cetakan dan sampel dibiarkan mengeras. Karakterisasi yang dilakukan terhadap sampel komposit pada penelitian ini meliputi pengujian dampak (ASTM D6110-10), pengujian tarik (ASTM D3039), pengujian kekerasan, Scanning Electron Microscope (SEM), dan pengujian balistik dengan mengacu pada standar NIJ 0101.06 Level II. Pengujian dilakukan dengan munisi kaliber 9 mm (MU-1TJ) dengan massa 8 gram dan kecepatan rata-rata 380m/s. Selain itu, dilakukan pula uji balistik dengan menggunakan munisi kaliber 5.56 mm (MU5-TJ) dengan massa 4 gram dan kecepatan rata-rata 915 m/s.

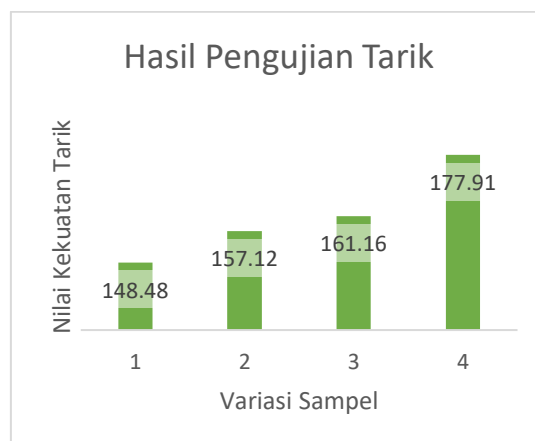


Gambar 2. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) (a) Proses vacuum sebelum sampel dialiri resin (b) Proses pengeringan sampel setelah sampel dialiri resin.

HASIL EKSPERIMEN

Pengujian Tarik

ASTM D 3039/D 3039M. Pengujian tarik dilakukan pada 5 spesimen tiap variasi sampel. Nilai rata-rata kekuatan tarik dari seluruh specimen pada tiap variasi penambahan serat ditampilkan pada **Gambar 3**. Hasil uji tarik dari variasi pertama diperoleh nilai kekuatan tarik sebesar 148,59 N/mm². Sedangkan hasil uji tarik dari variasi kedua diperoleh nilai kekuatan tarik sebesar 157,12 N/mm². Hasil uji tarik dari variasi ketiga diperoleh nilai kekuatan tarik sebesar 161,16 N/mm². Sedangkan hasil uji tarik dari variasi keempat diperoleh nilai kekuatan tarik sebesar 177,91 N/mm².

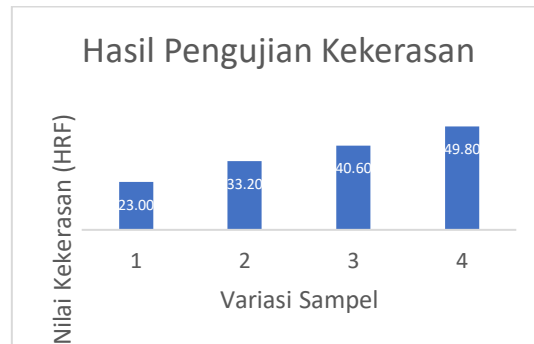


Gambar 3. Kurva Perbandingan Hasil Pengujian Tarik.

Berdasarkan hasil pengujian, variasi 1 dengan komposisi penambahan serat pelepah paling banyak yaitu 10% berat dan serat Kevlar paling sedikit yaitu 10% berat memiliki kekuatan tarik paling rendah dibandingkan dengan keempat variasi lainnya. Sedangkan, variasi 4 dengan komposisi penambahan serat pelepah paling sedikit yaitu 2,5% berat dan serat Kevlar paling banyak yaitu 25% berat memiliki kekuatan tarik paling tinggi dibandingkan dengan keempat variasi lainnya. Kekuatan tarik sangat dipengaruhi oleh material penyusun, dalam hal ini adalah komposisi serat yang ditambahkan. Penambahan serat Kevlar secara signifikan mampu meningkatkan nilai kekuatan tarik, sedangkan penambahan serat pelepah salak belum dapat dilihat pengaruhnya secara signifikan dalam meningkatkan nilai kekuatan tarik material.

Pengujian Keras

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode rockwell skala F dengan ukuran indenter 1/16 inch dan gaya sebesar 60 kgf. Pengujian dilakukan dengan melakukan indentasi pada 5 titik di tiap sampel. Nilai rata-rata kekerasan dari seluruh indentasi pada tiap variasi penambahan serat ditampilkan pada **Gambar 4**. Hasil uji keras dari variasi pertama diperoleh nilai kekerasan sebesar 23 HRF. Sedangkan hasil uji keras dari variasi 2 adalah 33.2 HRF. Hasil uji kekerasan pada variasi 3 adalah 40,6 HRF. Sedangkan pada variasi 4 diperoleh nilai kekerasan sebesar 49,8 HRF

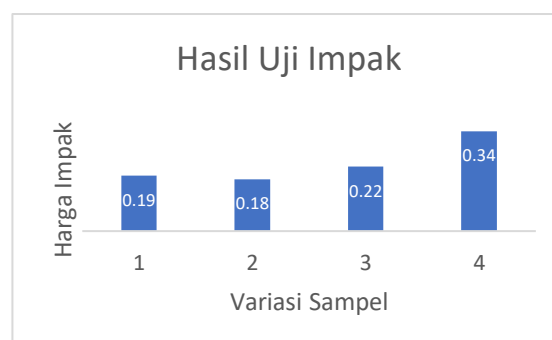


Gambar 4. Kurva Perbandingan Hasil Pengujian Keras.

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan, variasi 1 dengan komposisi penambahan serat pelepah paling banyak yaitu 10% berat dan serat Kevlar paling sedikit yaitu 10% berat memiliki nilai kekerasan paling rendah dibandingkan dengan keempat variasi lainnya. Sedangkan, variasi 4 dengan komposisi penambahan serat pelepah paling sedikit yaitu 2,5% berat dan serat Kevlar paling banyak yaitu 25% berat memiliki nilai kekerasan paling tinggi dibandingkan dengan keempat variasi lainnya. Hal ini disebabkan karena saat pengujian kekerasan, bagian yang diuji yaitu bagian atas yang terdiri dari filler SiC dan juga serat kevlar. Pengaruh peningkatan jumlah filler SiC juga membuat kekerasan menjadi lebih rendah tetapi peningkatan kekerasan ini lebih didominasi efek penambahan serat kevlar yang menghasilkan nilai kekerasan variasi keempat lebih besar.

Pengujian Impak

Spesimen uji yang digunakan mengikuti standar ASTM D 6110-10. Nilai rata-rata Harga Impak (HI) dari seluruh variasi penambahan serat (Variasi 1-4) disajikan pada Gambar 5. Tiap variasi sampel terdiri dari 5 (lima) buah specimen impak. Rata-rata harga impak pada variasi pertama adalah 0,19 J/mm², sedangkan harga impak variasi kedua adalah 0,18 J/mm².



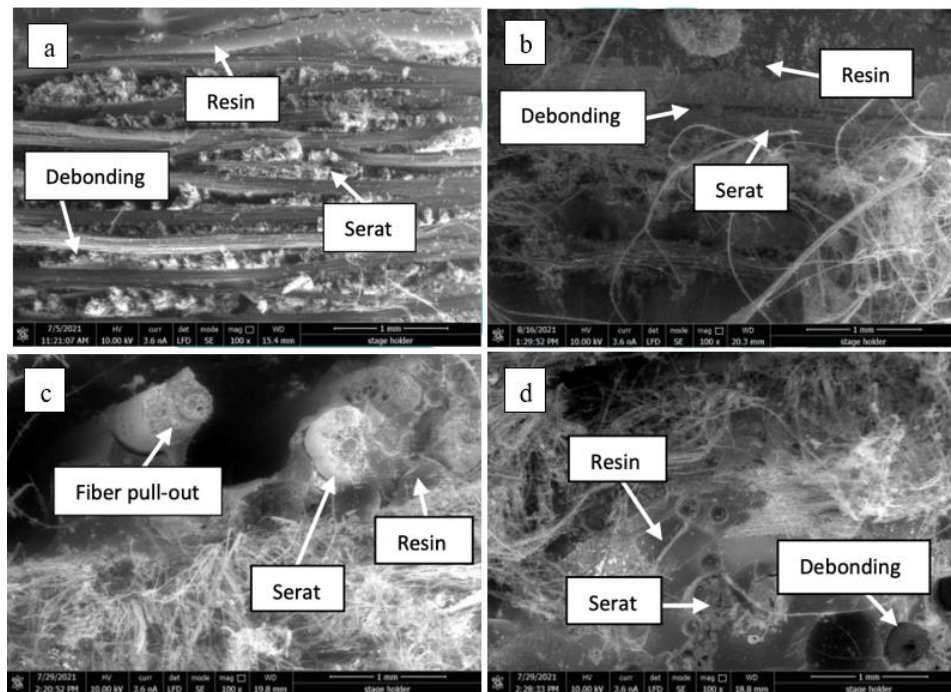
Gambar 5. Kurva Perbandingan Hasil Pengujian Impak.

Tinggi kandungan serat pelepah salak akan meningkatkan ketahanan bahan komposit terhadap pembebanan impak. Fenomena ini terkait adanya ikatan antara serat pelepah salak dan matriks yang baik sehingga transfer energi beban menjadi merata ke seluruh bagian serat. Oleh karena itu, jumlah serat pelepah salak yang semakin banyak akan menghasilkan ketahanan terhadap pembebanan impak semakin meningkat.

Rata-rata harga impact pada variasi ketiga adalah $0,22 \text{ J/mm}^2$, sedangkan harga impact variasi keempat adalah $0,34 \text{ J/mm}^2$. Terjadi peningkatan Harga Impact (HI) seiring dengan jumlah serat Kevlar di dalam komposit ini mengindikasikan bahwa komposisi serat kevlar mempengaruhi kekuatan impact bahan, dimana semakin tinggi kandungan serat kevlar akan meningkatkan ketahanan bahan komposit terhadap pembebanan impact. [15]

Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan Scanning Electron Microscope untuk mengetahui ikatan antara matriks dan penguat.



Gambar 6. Hasil pengamatan struktur mikro menggunakan SEM:

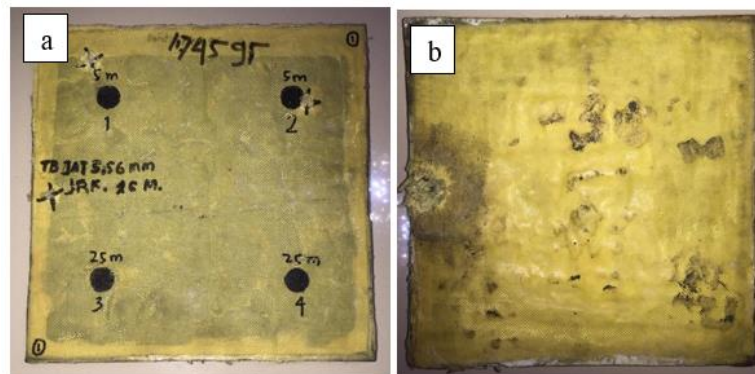
(a) Pengamatan sampel 1 (b) Pengamatan sampel 2 (c) Pengamatan sampel 3 (d) Pengamatan sampel 4.

Pada variasi pertama terlihat adanya debonding (kegagalan pelepasan ikatan) tetapi jika dilihat secara keseluruhan pada Gambar 6(a) bahwa matriks (resin) dan reinforcement (serat) sudah terikat dengan baik, hal inilah yang menjadikan kekuatan impact variasi pertama lebih tinggi dibanding variasi kedua, sedangkan pada variasi kedua juga tampak dengan jelas pada Gambar 6(b) bahwa (resin) dan reinforcement (serat) sudah terikat dengan baik.

Pada variasi ketiga terlihat adanya fiber pull-out (kegagalan penarikan keluar serat) pada Gambar 6(c) yang merupakan kegagalan putus keluar komponen reinforcement dari komponen matriks, hal inilah yang menjadikan kekuatan impact variasi ketiga lebih rendah dibanding variasi keempat tetapi ikatan antara matriks (resin) dan reinforcement (serat) sudah terikat dengan baik, sedangkan pada variasi keempat terlihat pada Gambar 6(d) bahwa matriks (resin) dan reinforcement (serat) sudah terikat dengan baik [16].

Pengujian Balistik

Spesimen Variasi 1



Gambar 7. Spesimen Variasi 1: (a) Hasil penembakan komposit spesimen 1 pada bagian depan (b) Hasil penembakan komposit spesimen 1 pada bagian belakang.

Bahan komposit dengan komposisi yang terdiri dari 60% resin, 10% serat pelepah salak, 5% filler SiC, 5% filler Al₂O₃, 10% serat karbon dan 10% serat kevlar dilakukan pengujian balistik menggunakan munisi kaliber 9 mm dan pistol P1 Pindad dengan jarak 5 m yang mengacu pada NIJ 0101.06 Level II. Hasil BFS yang diperoleh adalah 3.79 mm, karena hasil BFS yang diperoleh masih jauh dari 44 mm yang artinya sangat aman dan lolos pada level IIA dan II, sehingga perlu dilakukan pengujian ke satu level berikutnya yaitu IIIA tetapi karena adanya keterbatasan munisi maka dilakukan pengujian ke dua level di atasnya yaitu level III dengan kaliber 5.56x45 mm, senapan SS1 dan jarak 25 m. Komposit ditembakkan pada bagian kiri bawah. Hasil yang diperoleh adalah tembus karena tidak dapat menahan dampak saat peluru menerjang yang artinya tidak aman dan tidak lolos untuk ke level III. Hasil penembakan dapat dilihat pada Gambar 7(a) dan Gambar 7(b).

Spesimen Variasi 2

Bahan komposit dengan komposisi yang terdiri dari 60% resin, 5% serat pelepah salak, 5% filler SiC, 5% filler Al₂O₃, 10% serat karbon dan 15% serat kevlar dilakukan pengujian balistik menggunakan kaliber 9 mm dan pistol P1 Pindad dengan jarak 5 m yang mengacu pada NIJ 0101.06 Level II. Hasil yang diperoleh adalah tidak tembus dengan BFS 9.18 mm, karena hasil BFS yang diperoleh masih jauh dari 44 mm yang artinya sangat aman dan lolos pada level IIA dan II, sehingga perlu dilakukan pengujian ke satu level berikutnya yaitu IIIA tetapi karena adanya keterbatasan munisi maka dilakukan pengujian ke dua level di atasnya yaitu level III dengan kaliber 5.56x45 mm, senapan SS1 dan jarak 25 m. Komposit ditembakkan pada bagian kiri bawah. Hasil yang diperoleh adalah tembus karena tidak dapat menahan dampak saat peluru menerjang yang artinya tidak aman dan tidak lolos untuk ke level III.

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh J. Naveen et al menyatakan bahwa rompi tahan peluru berbasis serat alami memiliki kedalaman lekukan yang lebih rendah dibandingkan dengan rompi tahan peluru berbasis serat Kevlar [17].

Penelitian saat ini menunjukkan bahwa komposisi serat pelepah salak sangat mempengaruhi kekuatan balistik bahan, dimana semakin tinggi kandungan serat pelepah salak (dalam kasus ini dari 5% menjadi 10%) akan meningkatkan ketahanan bahan komposit terhadap pembebanan tembak. Hal ini dibuktikan spesimen dengan kandungan serat pelepah salak 10% memiliki BFS yang minim yaitu 3,79 mm dibandingkan spesimen dengan kandungan serat pelepah salak 5% memiliki BFS sebesar 9,18 mm. Bahan rompi tahan peluru dengan komposisi serat pelepah salak yang lebih banyak, memiliki hasil lekukan kedalaman yang lebih rendah. Dengan kata lain bahan tahan peluru yang memiliki komposisi serat pelepah salak rendah diperoleh hasil BFS

58% lebih tinggi, tetapi masih dibawah batas yang disyaratkan sesuai standar yaitu 44 mm [18]. Keberadaan serat alam berupa serat pelepah salak pada variasi 1 dan 2 tentunya mampu mengurangi penggunaan serat sintetis (serat kevlar) sehingga tentunya akan mengurangi pula biaya produksi dimana serat kevlar memiliki harga yang cukup mahal.

Kedua spesimen ini berhasil sebagai bahan tahan peluru standar NIJ level II dan IIA, dimana BFS yang ditentukan sesuai standar NIJ ini adalah sebesar 44 mm. Dengan hasil BFS yang masih jauh dari 44 mm, ada kemungkinan bahan ini pun akan berhasil di level IIIA karena menggunakan kecepatan sebesar 430 m/s dimana kecepatan tersebut tidak terlalu jauh rentangnya dengan level II sebesar 379 m/s, sehingga disarankan untuk dilaksanakan penelitian lanjutan dengan dilaksanakan pengujian level IIIA. Pengujian level III telah dilaksanakan juga dengan menggunakan senapan laras panjang dengan hasil semua spesimen tembus.

Berat spesimen dengan komposisi serat pelepah salak 10% dan serat kevlar 10% sebesar 1.877,5 gr sedangkan berat spesimen dengan komposisi serat pelepah salak 5% dan serat kevlar 15% sebesar 1.898,7 gr, sehingga dari komposisi tersebut spesimen dengan kemampuan balistik terbaik memiliki berat yang lebih kecil. Ini juga sangat efisien untuk mobilitas pasukan ketika menggunakan rompi tahan peluru.

Hasil dari uji balistik ini memiliki keterkaitan dengan hasil ketahanan impak, dimana spesimen yang memiliki ketahanan balistik yang baik, juga memiliki ketahanan impak yang baik.

Spesimen Variasi 3

Bahan komposit dengan komposisi yang terdiri dari 60% resin, 2.5% serat pelepah salak, 7.5% filler SiC, 7.5% filler Al₂O₃, 2.5% serat karbon dan 20% serat kevlar dilakukan pengujian balistik menggunakan kaliber 9 mm dan pistol P1 Pindad dengan jarak 5 m yang mengacu pada NIJ 0101.06 Level II. Hasil yang diperoleh adalah tidak tembus dengan BFS 7,10 mm, karena hasil BFS yang diperoleh masih jauh dari 44 mm yang artinya sangat aman dan lolos pada level IIA dan II, sehingga perlu dilakukan pengujian ke satu level berikutnya yaitu IIIA tetapi karena adanya keterbatasan munisi maka dilakukan pengujian ke dua level di atasnya yaitu level III dengan kaliber 5.56x45 mm, senapan SS1 dan jarak 25 m. Komposit ditembakkan pada bagian kanan atas. Hasil yang diperoleh adalah tembus karena tidak dapat menahan impact saat peluru menerjang yang artinya tidak aman dan tidak lolos untuk ke level III.

Spesimen Variasi 4

Bahan komposit dengan komposisi yang terdiri dari 60% resin, 2.5% serat pelepah salak, 5% filler SiC, 5% filler Al₂O₃, 2.5% serat karbon dan 25% serat kevlar dilakukan pengujian balistik menggunakan kaliber 9 mm dan pistol P1 Pindad dengan jarak 5 m yang mengacu pada NIJ 0101.06 Level II. Hasil yang diperoleh adalah tidak tembus dengan BFS 6,48 mm, karena hasil BFS yang diperoleh masih jauh dari 44 mm yang artinya sangat aman dan lolos pada level IIA dan II, sehingga perlu dilakukan pengujian ke satu level berikutnya yaitu IIIA tetapi karena adanya keterbatasan munisi maka dilakukan pengujian ke dua level di atasnya yaitu level III dengan kaliber 5.56x45 mm, senapan SS1 dan jarak 25 m. Komposit ditembakkan pada bagian kanan atas. Hasil yang diperoleh adalah tembus karena tidak dapat menahan impact saat peluru menerjang yang artinya tidak aman dan tidak lolos untuk ke level III.

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Deepak M.V.S et al menyatakan bahwa penambahan filler keramik seperti SiC dan Al₂O₃ pada serat kevlar menghasilkan peningkatan nilai kekuatan impak jika komposisi serat kevlar bernilai konstan. Serat kevlar biasanya tahan terhadap benturan dan dapat menahan keretakan yang merambat [19].

Penelitian saat ini menunjukkan bahwa saat melakukan perubahan dengan memvariasikan serat kevlar dan juga filler keramik (SiC dan Al₂O₃), serat kevlar sangat mempengaruhi kekuatan balistik bahan, dimana semakin tinggi kandungan serat kevlar (dalam kasus ini dari 20% menjadi 25%) akan meningkatkan ketahanan bahan komposit terhadap pembebanan tembak. Hal ini dibuktikan spesimen dengan kandungan serat kevlar 25% memiliki BFS yang minim yaitu 6,48 mm dibandingkan spesimen dengan kandungan serat kevlar 20% memiliki BFS sebesar 7,10 mm. Bahan rompi tahan peluru dengan komposisi serat kevlar yang lebih banyak,

memiliki hasil lekukan kedalaman yang lebih rendah. Dengan kata lain bahan tahan peluru yang memiliki komposisi serat kevlar rendah diperoleh hasil BFS 8,73% lebih tinggi, tetapi masih dibawah batas yang disyaratkan sesuai standar yaitu 44 mm [18]. Keberadaan filler keramik SiC dan Al₂O₃ tentunya mampu mengurangi penggunaan serat kevlar.

Kedua spesimen ini berhasil sebagai bahan tahan peluru standar NIJ level II dan IIA, dimana BFS yang ditentukan sesuai standar NIJ ini adalah sebesar 44 mm. Dengan hasil BFS yang masih jauh dari 44 mm, ada kemungkinan bahan ini pun akan berhasil di level IIIA, sehingga disarankan untuk dilaksanakan penelitian lanjutan dengan dilaksanakan pengujian level IIIA. Pengujian level III telah dilaksanakan juga dengan menggunakan senapan laras panjang dengan hasil semua spesimen tembus.

Berat spesimen dengan komposisi filler keramik (SiC dan Al₂O₃) 15% dan serat kevlar 20% sebesar 2018,7 gr sedangkan berat spesimen dengan komposisi komposisi filler keramik (SiC dan Al₂O₃) 10% dan serat kevlar 25% sebesar 1.885 gr, sehingga dari komposisi tersebut spesimen dengan kemampuan balistik terbaik memiliki berat yang lebih kecil. Ini juga sangat efisien untuk mobilitas pasukan ketika menggunakan rompi tahan peluru.

Hasil dari uji balistik ini memiliki keterkaitan dengan hasil ketahanan impak, dimana spesimen yang memiliki ketahanan balistik yang baik, juga memiliki ketahanan impak yang baik.

Berikut hasil pengujian balistik terhadap spesimen komposit yang dilaksanakan di lapangan tembak dapat dilihat pada tabel 2 dan tabel 3.

Tabel 2. Hasil pengujian balistik level II

Spesimen	Jarak Penembakan (m)	Jenis Munisi (mm)	Jenis Pistol	Ukuran Spesimen (cm)	Berat Spesimen (gr)	Hasil		
						Tembus/Tidak Tembus	BFS (mm)	Level NIJ
1	5	9	P1 Pindad	25x25x2	1877,5	Tidak Tembus	3,79	II
2	5	9	P1 Pindad	25x25x2	1898,75	Tidak Tembus	9,18	II
3	5	9	P1 Pindad	25x25x2	2018,7	Tidak Tembus	7,1	II
4	5	9	P1 Pindad	25x25x2	1885	Tidak Tembus	6,48	II

Tabel 3. Hasil pengujian balistik level III

Spesimen	Jarak Penembakan (m)	Jenis Munisi (mm)	Jenis Senapan	Ukuran Spesimen (cm)	Berat Spesimen (gr)	Hasil		
						Tembus/Tidak Tembus	BFS (mm)	Level NIJ
1	25	5,56	SS1	25x25x2	1877,5	Tembus	-	III
2	25	5,56	SS1	25x25x2	1898,75	Tembus	-	III
3	25	5,56	SS1	25x25x2	2018,7	Tembus	-	III
4	25	5,56	SS1	25x25x2	1885	Tembus	-	III

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah:

- Metode Vaccum Assisted Resin Tranfer Molding (VARTM) dengan cetakan ketiga merupakan modifikasi terbaik karena menghasilkan distribusi resin dan manufaktur yang lebih cepat.

- b. Kekuatan impak, kekuatan tarik, kekerasan, mikrostruktur dan kemampuan balistik dari variasi 1, 2, 3, dan 4 diperoleh sebagai berikut:
- 1) Nilai kekuatan impak pada variasi 1 (60% resin, 10% serat pelepah salak, 5% filler SiC, 5% filler Al₂O₃, 10% serat karbon dan 10% serat kevlar) sebesar 0,19 J/mm², sedangkan pada variasi 2 (60% resin, 5% filler SiC, 5% filler Al₂O₃, 5% serat pelepah salak, 10% serat karbon dan 15% serat kevlar) sebesar 0,17 J/mm². Sehingga variasi 1 memiliki kekuatan impak 10,5% lebih besar dibanding variasi 2. Nilai kekuatan impak ada variasi 3 (60% resin, 7,5% filler SiC, 7,5% filler Al₂O₃, 2,5% serat pelepah salak, 2,5% serat karbon dan 20% serat kevlar) sebesar 0,22 J/mm², sedangkan pada variasi 4 (60% resin + 5% filler SiC + 5% filler Al₂O₃ + 2,5% serat pelepah salak + 2,5% serat karbon + 25% serat kevlar) sebesar 0,34 J/mm². Sehingga variasi 4 memiliki kekuatan impak 35,3% lebih besar dibanding variasi 3.
 - 2) Nilai kekerasan pada variasi 1 sebesar 22,72 HRF, sedangkan nilai kekerasan pada variasi 2 sebesar 33,12 HRF. Sehingga variasi 2 memiliki kekerasan 31,4% lebih besar dibanding variasi 1. Nilai kekerasan pada variasi 3 sebesar 40,52 HRF, sedangkan nilai kekerasan pada variasi 4 sebesar 49,56 HRF. Sehingga variasi 4 memiliki kekerasan 18,24% lebih besar dibanding variasi 1.
 - 3) Nilai kekuatan tarik pada variasi 1 sebesar 148,59 N/mm², regangan sebesar 0,04% dan modulus elastisitas sebesar 3746,81 N/mm². Nilai kekuatan tarik pada variasi 2 sebesar 246,93 N/mm², regangan sebesar 0,06% dan modulus elastisitas sebesar 4355,9 N/mm². Sehingga variasi 2 memiliki kekuatan tarik 39,8% lebih besar dibanding variasi 1. Sedangkan nilai kekuatan tarik pada variasi 3 sebesar 161,16 N/mm², regangan sebesar 0,04% dan modulus elastisitas sebesar 3779,98 N/mm². Nilai kekuatan tarik variasi 4 sebesar 177,91 N/mm², regangan sebesar 0,06%, modulus elastisitas sebesar 3190,45 N/mm². Sehingga variasi 4 memiliki kekuatan tarik 9,41% lebih besar dibanding variasi 3.
 - 4) Hasil BFS pada variasi 1 sebesar 3,79 mm dengan berat 1877,5 gr, sedangkan pada variasi 2 sebesar 9,18 mm dengan berat 1898,75 gr. Nilai BFS variasi 1 dan 2 sudah memenuhi syarat standar NIJ level II yaitu $u < 44$ mm. Hasil BFS pada variasi 3 sebesar 7,10 mm, sedangkan pada variasi 4 sebesar 6,48 mm. Nilai BFS variasi 3 dan 4 sudah memenuhi syarat standar NIJ level II. Sehingga dari variasi 1,2,3 dan 4 yang terbaik yaitu variasi 4 karena memiliki berat yang lebih kecil dan nilai BFS yang masih aman.
 - 5) Hasil uji SEM dari variasi 1,2,3,4 terlihat bahwa matrik (resin) dan reinforcement (serat) sudah terikat dengan baik.

REFERENSI

1. Department of Justice U, of Justice Programs O, Institute of Justice N. Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06 [Internet]. Available from: www.ojp.usdoj.gov/nij
2. Lakshmi L, Nandakumar CG. *Investigations on the Performance of Metallic and Composite Body Armors*. Procedia Technology, 2016. **25**:170–7.
3. FIBER-REINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Design.
4. Azhar ABM, Risby MS, Sohaimi ASM, Hafizi MN, Khalis S, Asrul S. *Conceptual mold design for multi-curved natural fiber reinforced composite body armor panel*. Procedia CIRP. Elsevier B.V, 2015: p. 95–100.
5. Pulungan, Muhammad Anha, *Analisis Kemampuan Rompi Anti Peluru Yang Terbuat Dari Komposit Hgm-Epoxy Dan Serat Karbon Dalam Menyerap Energi Akibat Impact Peluru*. Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
6. Rajesh S, Vijayaramnath B, Elanchezhian C, Vivek S, Prasad MH, Kesavan M. *Experimental Investigation of Tensile and Impact Behavior of Aramid-Natural Fiber Composite*. Materials Today Proceeding, 2019. **16**:699–705.
7. Stopforth R, Adali S. *Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles*. Defence Technology, 2019. **15**(2):86–92.
8. Azmi AMR, Sultan MTH, Hamdan A, Nor AFM, Jayakrishna K. *Flexural and Impact Properties of A New Bulletproof Vest Insert Plate Design Using Kenaf Fibre Embedded With X-Ray Films*. Materials Today Proceeding, 2018. **5**(5, Part 2):11193–7.
9. Azmi A, Sultan MTH, Jawaid M, Nor AFM. *A newly developed bulletproof vest using kenaf-X-ray film hybrid composites*, 2019. p. 157–69.
10. Nurazzi NM, Asyraf MRM, Khalina A, Abdullah N, Aisyah HA, Rafiqah SA, et al. *A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications*. Polymers, 2021. **13**(4):1–42.
11. Yudha V, Rochardjo HSB, Jamasri J, Widyorini R, Yudhanto F, Darmanto S. *Isolation of cellulose from salacca midrib fibers by chemical treatments*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing; 2018.

12. Triyastiti L, Krisdiyanto D. *Isoalasi Nanokristal Selulosa Dari Pelepah Pohon Salak Sebagai Filler Pada Film Berbasis Polivinil Alkohol (PVA)*. Indonesian Journal of Materials Chemistry IJMC, 2018. **1**.
13. Hancioglu M, Sozer EM, Advani SG. *Comparison of in-plane resin transfer molding and vacuum-assisted resin transfer molding 'effective' permeabilities based on mold filling experiments and simulations*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2020. **39(1–2)**:31–44.
14. Polowick C. *Optimizing Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) Processing Parameters to Improve Part Quality*.
15. Priyanka P, Dixit A, Mali HS. *High strength Kevlar fiber reinforced advanced textile composites*. Iranian Polymer Journal (English Edition), 2019. **28**. p. 621–38.
16. Callister WD. *Materials science and engineering : an introduction*. John Wiley & Sons; 2007.
17. Naveen J, Jayakrishna K, Hameed Sultan MT Bin, Amir SMM. *Ballistic Performance of Natural Fiber Based Soft and Hard Body Armour- A Mini Review*. Frontiers in Materials. Frontiers Media S.A, 2020. **7**.
18. da Luz FS, Filho F da CG, Oliveira MS, Nascimento LFC, Monteiro SN. *Composites with natural fibers and conventional materials applied in a hard armor: A comparison*. Polymers (Basel). 2020.**12(9)**.
19. Mvs D, Subbaya KM, R TS, Chikkala A, Veera Gowda PK, Almos SS. *IMPACT BEHAVIOR OF HYBRID NANO FILLED KEVLAR REINFORCED COMPOSITES*. 2020;