

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Peredam Mekanik Balistik

Peredaman mekanik merupakan proses kritikal dalam mengelola energi mekanik yang dihasilkan oleh getaran dengan cara mengubahnya menjadi bentuk energi lain. Proses ini bertujuan untuk mengurangi dampak getaran yang tidak diinginkan seperti kenyamanan pengguna. Material peredam mekanik berfungsi dengan menyerap energi getaran. Mekanisme peredaman getaran dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk viskoelastisitas, deformasi plastik, atau resonansi (Amiruddin et al., 2013). Ketika peluru mengenai peredam, material tersebut akan menyerap energi melalui deformasi elastis terlebih dahulu, sebelum beralih ke deformasi plastis untuk mengurangi dampak lebih lanjut. Sejalan dengan itu, Cahn, Mughrabi, Haasen, dan Kramer (1993) menyebutkan bahwa *"Plastic deformation and fracture mechanisms are critical in understanding material behavior under high-impact scenarios"* (p. 23), yang berarti mekanisme deformasi plastik memainkan peran kunci dalam memastikan material tidak rusak total dalam skenario benturan tinggi.

Material elastis memiliki kemampuan untuk kembali ke bentuk semula setelah mengalami deformasi, yang merupakan karakteristik penting dalam efektivitas material peredam (Sari et al., 2017). Dalam bukunya, menurut Yang (2022) menyatakan, *"Stress, Strain, and Structural Dynamics is a comprehensive and definitive reference to statics and dynamics of solids and structures, including mechanics of materials, structural mechanics, elasticity, rigid-body dynamics, vibrations, structural dynamics, and structural controls"* (p.1). Hal ini menekankan betapa pentingnya memahami prinsip dasar elastisitas dan dinamika struktural untuk merancang peredam balistik yang efektif.

2.1.2 Rompi Anti Peluru

Rompi anti peluru merupakan perlengkapan pelindung yang dirancang untuk melindungi tubuh dari penetrasi proyektil berkecepatan tinggi. Pelindung balistik berfungsi sebagai penahan sekaligus menyerap energi tumbukan proyektil yang ditembakkan dari senjata api sehingga tidak melukai penggunanya dengan menyerap dan menyebarkan energi kinetiknya (Pulungan et al., 2019). Pelindung balistik harus sangat efektif dipakai oleh personal militer. Oleh karena itu, bobot, mobilitas, dan kenyamanan sangat penting. Sejarah penggunaan rompi anti peluru telah ada sejak perang dunia, ketika material berat seperti logam digunakan untuk menahan serangan peluru. Seiring perkembangan teknologi, rompi anti peluru modern menggabungkan material komposit yang lebih ringan namun tetap kuat, menjadikannya nyaman untuk digunakan dalam jangka waktu lama serta memberikan perlindungan optimal. Mekanisme kinerja balistik pada rompi anti peluru ketika peluru mengenai rompi anti peluru, energi kinetiknya diserap dan didistribusikan oleh material pelindung. Serat bekerja menahan deformasi, sementara lapisan keras memecah peluru untuk mengurangi penetrasi, melindungi tubuh pengguna. Di sisi lain, perkembangan juga terjadi pada *hard body armor* yang memanfaatkan material keras seperti baja dan keramik untuk menahan ancaman dengan kecepatan proyektil lebih tinggi, yang biasanya digunakan oleh pasukan militer dalam kondisi tempur. Material komposit modern terus mengalami perkembangan, memberikan kombinasi terbaik antara berat ringan dan daya tahan tinggi.

Rompi anti peluru ini dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu *hard body armor* dan *soft body armor*. Umumnya tingkat perlindungan *hard body armor* lebih baik dibandingkan *soft body armor*. Perlindungan balistik *soft body armor* lebih disukai karena sifatnya yang fleksibel, ringan, dan nyaman (Wang et al., 2014).

Tabel 2. 1 Daftar standar pada jenis pelindung balistik

Level	Test	Peluru	Masa Peluru	Kecepatan Uji (m/s atau ft/s)	Tekanan per panel sudut 0°	Maksimum <i>Back Face Signature</i> (BFS) (mm)	Tekanan per panel sudut 30° 45°
II A	1	9 mm, FMJ RN	8,0 (124 gr)	373 atau 1224	4	44	2
	2	40, S&W FMJ	11,7 (180 gr)	352 atau 1155	4	44	2
II	1	9 mm, FMJ RN	8,0 (124 gr)	398 atau 1306	4	44	2
	2	357, Magnum, JSP	10,2 (158 gr)	436 atau 1430	4	44	2
III A	1	357 SIG, FMJ FN	8,1 (125 gr)	448 atau 1470	4	44	2
	2	44, Magnum, SJHP	15,6 (240 gr)	436 atau 1430	4	44	2
III	1	7,62 mm, NATO FMJ	9,6 (148 gr)	847 atau 2780	6	44	0
IV	1	30 Caliber M2 AP	10,8 (166 gr)	878 atau 2880	1 - 6	44	0

Sumber: (Nurazzi et al., 2021).

2.1.2.1 *Soft Body Armor*

Soft body armor merupakan jenis rompi anti peluru yang dirancang dengan menggunakan bahan fleksibel untuk menghadapi ancaman balistik ringan. Biasanya, *soft body armor* terbuat dari lapisan serat sintetis yang dikenal akan kekuatannya dalam menahan proyektil yang memiliki kecepatan relatif rendah (Safaat et al., 2022). Pelindung tubuh yang lunak, yang ringan dan fleksibel, mencakup tingkat perlindungan IIA, II, dan IIIA. Level II merupakan rompi pelindung untuk menahan peluru berkecepatan rendah seperti 9 mm FMJ, .40 S&W, dan 0.357 *Magnum*. Level IIA dirancang untuk peluru berkaliber rendah dengan kecepatan sedang, seperti 9 mm FMJ dan 0.40 S&W, ideal untuk pengamanan dari pistol dalam situasi tanpa ancaman berat. Level IIIA memberikan perlindungan lebih kuat dari Level II, mampu menahan peluru dengan kecepatan lebih tinggi, seperti 9 mm FMJ dan 0.44 *Magnum*. Biasanya digunakan dalam situasi darurat atau taktis, meskipun sedikit lebih berat dan kurang fleksibel, masih lebih ringan daripada Level III dan IV. Ini dirancang untuk mengalahkan 9mm (398m/s) hingga 0,44 *Magnum* (436m/s) peluru (Nurazzi et al., 2021).

2.1.2.2 *Hard Body Armor*

Berbeda dengan *soft body armor*, *hard body armor* menggunakan material keras yang mampu menahan proyektil dengan kecepatan tinggi (Maulana et al., 2023). Sedangkan pelindung tubuh keras, yang terdiri dari pelat keramik mempunyai tingkat perlindungan III dan IV lebih tinggi yang mampu menghilangkan ancaman sebesar 7.62 mm dan 0.30 amunisi penusuk lapis baja (Nurazzi et al., 2021). Kelebihan dari *hard body armor* adalah kemampuannya untuk menahan penetrasi proyektil dengan energi kinetik besar, namun sering kali kurang nyaman untuk digunakan karena berat dan kekakuannya (Maulana et al., 2023). Ghofur (2021) "material komposit menunjukkan ketahanan benturan yang tinggi dan kemampuan penyerapan energi". Selain menahan peluru, *hard body armor* juga dirancang untuk melindungi pengguna dari pecahan atau fragmentasi yang bisa terjadi akibat ledakan atau dampak proyektil (Nurazzi et al., 2021).

2.1.3 Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit

Industri kelapa sawit menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar yang berdampak buruk terhadap lingkungan (Sabil et al., 2013). TKKS adalah limbah hasil pengolahan *Crude Palm Oil* (CPO) di Pabrik Kelapa Sawit. OPB juga merupakan biomassa lignoselulosa, terdiri dari hemiselulosa, selulosa, lignin (Nabila et al., 2023). Serat TKKS, dengan struktur seratnya yang khas, memiliki keunggulan kekuatan mekanik yang cukup baik dan dapat digunakan memperkuat komposit (Rahmasita et al., 2017). Penelitian menunjukkan bahwa kekuatan benturan bahan anti peluru meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi serat TKKS, dengan bio-komposit 18% serat TKKS menunjukkan kekuatan benturan terbaik (Riza et al., 2022). Serat TKKS dan karet alam dalam material peredam mekanik menciptakan sinergi optimal (Abdulrazizq et al., 2022). Selain itu menyediakan solusi berkelanjutan yang memanfaatkan bahan alami dan limbah industri, sehingga ramah lingkungan dalam pengelolaan pada peredam mekanik (Taherzadeh et al., 2022). Sifat Mekanik serat tandan kosong kelapa sawit ditulis pada tabel dibawah:

Tabel 2. 2 *Mechanical and physical properties of oil palm empty fruit bunch fiber (OPEFB)*

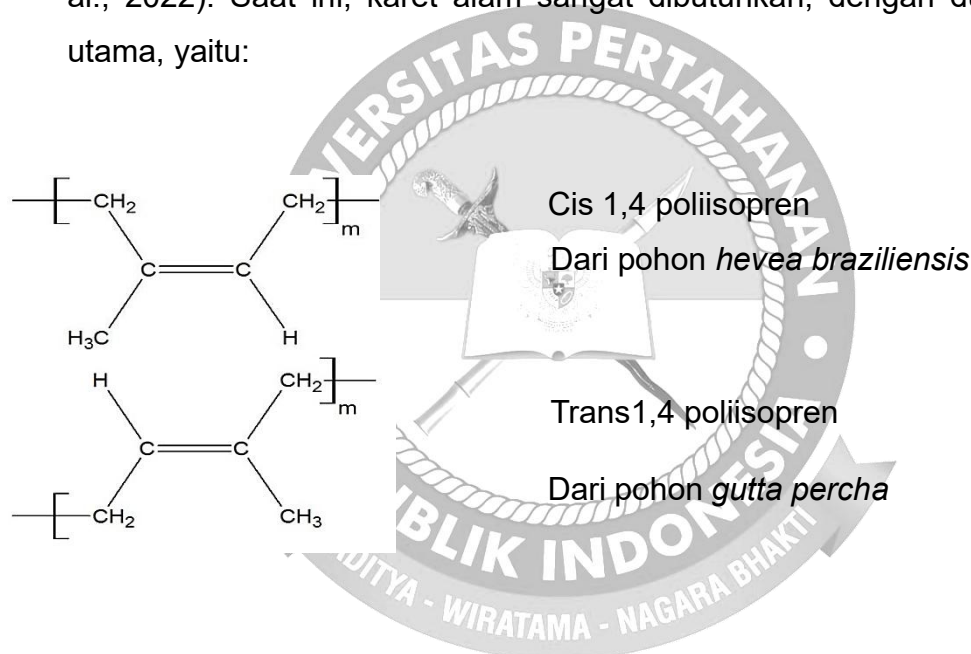
<i>Properties</i>	<i>OPEFB Fiber</i>
<i>Tensile strength</i> (Mpa)	60-81
<i>Young Modulus</i> (Gpa)	1 – 1 - 9
<i>Density</i> (g/cm ³)	0.7 – 1.55
<i>Diameter</i> (μm)	250 – 610
<i>Elongation at break</i> (%)	8 - 18

Sumber: (Ramlee et al., 2019)

2.1.4 Karet Alam

Karet alam adalah polimer alami yang diperoleh dari lateks tanaman *Hevea brasiliensis*, dikenal karena elastisitas tinggi, ketahanan terhadap deformasi, dan kemampuannya dalam menyerap energi. Jenis *Ribbed Smoked Sheet* (RSS) 1, memiliki karakteristik elastisitas dan daya tahan mekanik yang sangat baik, menjadikannya material yang ideal untuk aplikasi komposit balistik. Menggunakan teori yang telah dijelaskan pada

landasan teori peredam mekanik balistik. Dalam penelitian material komposit, karet alam dipilih karena kemampuannya dalam meredam getaran dan meningkatkan ketahanan material. Untuk deformasi elastis, hubungan antara gaya yang diberikan dan perubahan panjang (regangan) mengikuti hukum *Hooke*, yang menyatakan bahwa gaya sebanding dengan regangan, selama gaya tidak melebihi batas elastis material (Taherzadeh et al., 2022). Saat ini, karet alam sangat dibutuhkan, dengan dua struktur utama, yaitu:



Gambar 2. 1 Struktur Kimia Karet Alam

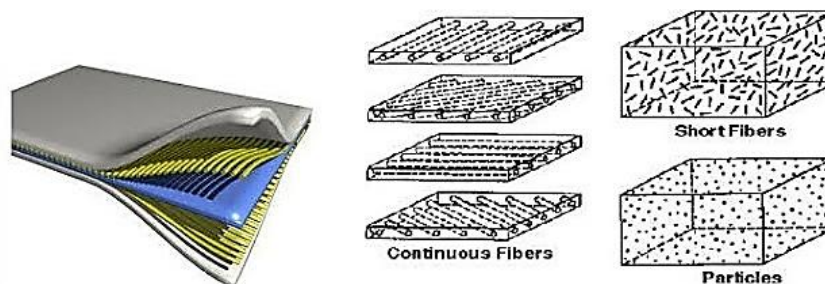
Sumber: (NIIR Board of Consultants and Engineers, 2006)

RSS1 atau *Ribbed Smoked Sheet 1*, adalah standar kualitas tertinggi dari karet alam yang sering digunakan sebagai bahan baku dalam industri komposit. Proses produksinya melibatkan pengasapan dan pengeringan yang cermat untuk memastikan kestabilan sifat mekanik dan elastisitas. Material ini memiliki keunggulan dalam hal kekuatan tarik dan daya tahan elastis, yang menjadikannya pilihan utama untuk komposit balistik. "Penggunaan serat alam memberikan keuntungan dalam mengurangi berat dan menambah fleksibilitas, tanpa mengurangi daya tahan komposit" (Farid et al., 2024).

2.1.5 Komposit

Komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih material yang berbeda, yang digabungkan secara fisik untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang lebih unggul dibandingkan material penyusunnya. (Arista et al., 2013) Kata komposit berasal dari kata “*to compose*” yang berarti menyusun atau menggabungkan secara sederhana bahan komposit yang berarti bahan gabungan dari dua atau lebih bahan yang berlainan. Jadi komposit adalah salah satu bahan yang merupakan gabungan atau campuran dari dua material atau lebih dari skala makroskopis untuk membentuk material ketiga yang lebih bermanfaat. Komposit dan *alloy* memiliki perbedaan dari cara penggabungannya yaitu apabila komposit digabung secara makroskopis sehingga masih kelihatan serat maupun matriknya (komposit serat) sedangkan pada *alloy* paduan digabung secara mikroskopis sehingga tidak lagi kelihatan unsur-unsur pendukungnya (Jones et al., 1975).

Pada material komposit, terdapat dua komponen utama, yaitu komponen primer dan komponen sekunder. Komponen primer berfungsi sebagai matriks, sementara komponen sekunder bertindak sebagai penguat atau pengikat. Penguat biasanya hadir dalam bentuk serat atau partikel yang memberikan kekuatan pada komposit. Secara umum, matriks dan penguat pada komposit tidak dapat saling larut, namun keduanya tetap saling menempel dan bekerja bersama untuk meningkatkan performa material (Arista et al., 2013).



Gambar 2. 2 Struktur Komposit

Sumber: (Anhar et al., 2017)

2.1.6 Teori Dasar Karet

Modulus Young adalah ukuran elastisitas suatu material yang menggambarkan kemampuan material tersebut untuk mengalami deformasi elastis (pemanjangan atau penyusutan) ketika diberikan tegangan. Secara matematis, *modulus Young* dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan (*stress*) terhadap regangan (*strain*) pada daerah elastis material, sesuai dengan persamaan:

$$E = \frac{F}{\Delta L} \quad (2.1)$$

Di mana:

E = Modulus Elastisitas (Pa)

F = Gaya (N)

ΔL = Perubahan Panjang (m)

Nilai *modulus Young* menentukan kekakuan material: semakin besar nilainya, semakin sulit material tersebut untuk mengalami deformasi elastis.

2.1.7 Teori Tegangan Regangan

Pemahaman yang mendalam mengenai hubungan antara tegangan dan regangan pada material elastis seperti karet adalah esensial untuk menilai respons material ini terhadap beban balistik. Tegangan adalah gaya yang diterapkan pada suatu area tertentu dari material, sementara regangan adalah perubahan bentuk yang terjadi sebagai respons terhadap gaya tersebut. Pada material elastis seperti karet, sifat-sifat ini memungkinkan material untuk merespons tekanan dengan deformasi yang sementara dan reversibel, dimana karet dapat meregang hingga batas tertentu dan kembali ke bentuk aslinya. Hukum *Hooke* menjadi landasan dalam menganalisis hubungan ini, menyatakan bahwa pada rentang elastis tertentu, tegangan sebanding dengan regangan. Sesuai dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Di mana:

σ = Tegangan (N/m^2)

F = Gaya Tarik (N)

A = Luas Penampang (m^2)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.3)$$

Di mana:

ε = Regangan

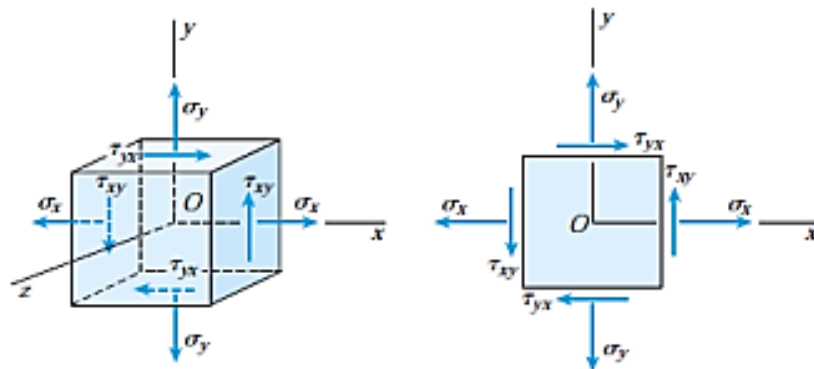
ΔL = Perubahan panjang benda (m)

L_0 = Panjang awal benda (m)

Komponen-komponen tegangan bidang bekerja dalam dua arah saja (tidak pada arah sumbu z) dan tegangan geser xy sama dengan tegangan yx.

$$\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0 \quad (2.4)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (2.5)$$



Gambar 2. 3 Tegangan yang bekerja pada suatu bidang xy

Sumber: (Gere & James M. 2004.)

2.1.8 Teori Redaman

Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) adalah alat yang digunakan untuk mengukur sifat mekanik bahan, khususnya polimer, elastomer, dan bahan komposit, saat diberi beban dinamis pada berbagai kondisi suhu, frekuensi, dan deformasi. DMA memberikan informasi penting tentang viskoelastisitas bahan dan dapat digunakan untuk mempelajari bagaimana material merespons terhadap stres yang berubah seiring waktu, frekuensi, dan suhu.

Pada *Dynamic Mechanical Analyzer* (DMA), respons material terhadap gelombang mekanik dapat digambarkan dengan dua komponen utama, yaitu Modulus Penyimpanan (*Storage Modulus*, E') dan Modulus Kehilangan (*Loss Modulus*, E''). Modulus Penyimpanan mengacu pada bagian dari modulus material yang menyimpan energi elastis, dan mengukur kemampuan material untuk kembali ke bentuk semula setelah diberi gaya. Sementara itu, Modulus Kehilangan mengukur energi yang hilang dalam bentuk panas selama siklus deformasi, yang berkaitan langsung dengan tingkat redaman dalam material. Material dengan *loss modulus* tinggi akan menunjukkan tingkat redaman yang lebih besar, menandakan kemampuan material untuk menyerap energi mekanik dan mengurangi getaran atau pergerakan. (Young & Freedman, 2015).

Redaman (δ) sendiri didefinisikan sebagai rasio antara *loss modulus* dan *storage modulus*, yang dihitung dengan rumus:

$$\tan(\delta) = \frac{E''}{E'} \quad (2.6)$$

Dimana:

E' = Modulus Penyimpanan (Pa)

E'' = Modulus Kehilangan (Pa)

$\tan(\delta)$ adalah parameter yang menggambarkan faktor redaman material, yang menunjukkan seberapa besar energi yang hilang selama satu siklus getaran relatif terhadap energi yang disimpan (Young & Freedman, 2015). Optimasi sifat viskoelastik, khususnya melalui peningkatan nilai $\tan \delta$, terbukti mampu meningkatkan kemampuan redaman energi pada material berbasis karet, yang berkontribusi signifikan terhadap kinerja proteksi balistik material tersebut (Yousif et al., 2020).

Nilai $\tan \delta$ yang lebih tinggi pada material komposit menandakan kapasitas redaman viskoelastik yang lebih besar, yang secara langsung berkorelasi dengan peningkatan kemampuan penyerapan energi saat uji balistik. Hal ini menunjukkan bahwa sifat viskoelastik terutama dalam domain suhu transisi kaca (T_g) berperan penting dalam mengurangi energi kinetik proyektil melalui disipasi energi internal dalam matriks polimer (da silvi et al., 2022).

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu menjadi referensi penting dalam pengembangan penelitian ini. Fokus utama penelitian ini adalah karakterisasi material komposit dari Serat TKKS dan Karet alam untuk aplikasi peredam mekanik balistik pada rompi anti peluru. Meskipun sudah ada beberapa penelitian mengenai rompi anti peluru, belum ada yang secara khusus membahas komposisi karet yang digunakan dalam rompi tersebut. Perbandingan penelitian kali ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya akan disajikan pada Tabel 2.3 sebagai berikut:

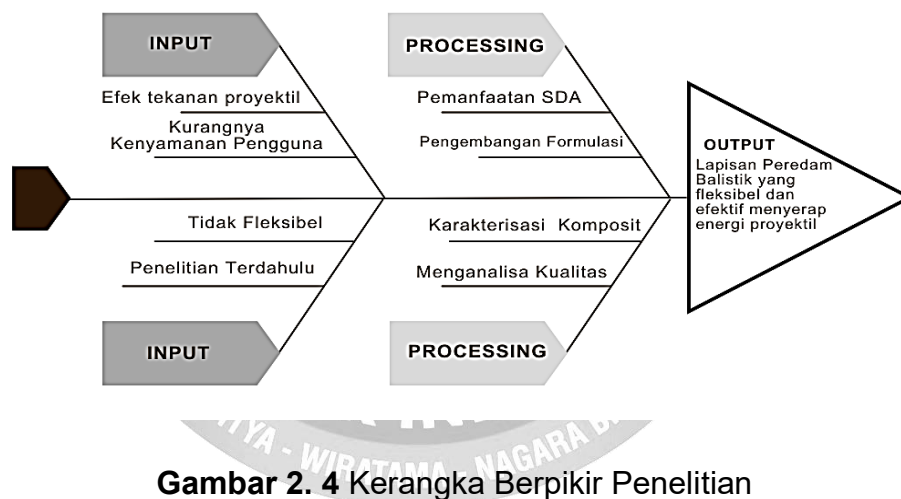
Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu

Judul	Metode	Persamaan	Perbedaan	Keterbaruan
<i>Oil Palm Fibre-Reinforced Rubber Composite: Effects of Concentration and Modification of Fibre Surface</i> (Hanafi et al., 1997)	Menggunakan 2 perbandingan serat dengan perlakuan alkali dan tidak. Menggunakan serat dengan panjang 10 mm. Kemudian dicampur dengan karet menggunakan open mill.	Menggunakan karet alam dan serat kelapa sawit sebagai komposit. Melakukan treatment serat dengan cara alkalisasi	Menggunakan karet alam berasal dari indonesia dan serat tandan kosong kelapa sawit.	Memodifikasi permukaan serat menggunakan serat kelapa sawit dalam memperkuat komposit karet.
<i>Performance of Natural Rubber Coated Fabrics under Ballistic Impact</i> (Mohd Rozi et al., 2007)	Menggunakan pencelupan larutan untuk melapisi sampel dengan karet alam. Sampel dipotong dengan ukuran 350mm x 350mm. Dan menggunakan 4 teknik yang berbeda.	Menggunakan karet alam dan pengujian dampak balistik.	Menggunakan proses alkali serat dan memformulasikan karet dengan open mill.	Menggunakan 4 Teknik pencelupan yaitu <i>Single Dip, Single dip-pad, Double dip-pad, Dip-pad dip</i> .

<i>Characteristics of Bulletproof Vests Made from COPEFB Fiber</i> (Nikmatin et al., 2023)	Menggunakan serat dengan panjang 20-30 cm. Menggabungkan setiap serat dipelintir menjadi 4 variasi. Kemudian serat tersebut di tenun dengan ukuran 50mm x 50 mm.	Menggunakan serat tandan kosong kelapa sawit yang di aplikasikan pada rompi anti peluru.	Menggunakan proses alkali serat dan memformulasikan karet dengan open mill.	Serat TKKS yang digunakan sebagai bahan dasar rompi anti peluru dengan teknik anyaman.
<i>Development of sansevieria trifasciata/natural rubber composites for a soft body armor application</i> (Mardiyanti et al., 2023)	Melakukan proses alkali NaOH dengan 5 variasi. Memformulasikan karet alam degan proses peracikan menggunakan two roll mill. Karet alam dilarutkan toluena. Kemudian larutan tersebut dituangkan ke dalam kain ST disimpan selama 12 jam hingga toluena meluap sempurna.	Menggunakan proses alkali NaOH dan memformulasi kan karet dengan open mill.	Menggunakan serat tandan kosong kelapa sawit sebagai serat penguat komposit.	Mengkombinasi Serat ST dan karet alam dalam bentuk komposit dijadikan pelindung tubuh lunak.
<i>The effect of w oven oil palm empty fruit bunches (OPEFB) filler fiber on the mechanical properties of natural and synthetic rubber</i> (Nikmatin et al.,2022)	Menggunakan serat tandan kosong kelapa sawit dengan proses tenun variasi horizontal dan vertikal dengan jumlah lembar 14,20,28 dan di setiap variasinya disisipkan satu lembar karet alam.	Menggunakan serat tandan kosong kelapa sawit sebagai penguat pada karet alam.	Menggunakan proses alkali serat dan memformulasikan karet dengan open mill.	Menganalisis perbandingan srat alam dan dengan serat sintesis sebagai serat pengisi pada bentuk anyaman.

2.3 Kerangka Berpikir

Penelitian ini mengidentifikasi masalah terkait dampak getaran mekanik pada tubuh pengguna rompi anti peluru. Untuk mengurangi dampak balistik yang diterima tubuh, dilakukan pengembangan lapisan peredam mekanik dengan menambahkan karet yang diperkuat serat TKKS. Peneliti memanfaatkan sumber daya alam, mengembangkan formulasi, mengkarakterisasi komposit dan menganalisa kualitasnya. Kerangka berpikir ini dijelaskan pada gambar 2.4:



Gambar 2. 4 Kerangka Berpikir Penelitian

Sumber: diolah oleh peneliti

2.4 Hipotesis

1. Material komposit yang terbuat dari serat TKKS dan karet alam memiliki sifat mekanik yang baik dalam memberikan performa optimal dalam aplikasi peredam mekanik pada rompi anti peluru, dengan hasil pengujian yang dapat diterima.
2. Variasi optimasi formula karet alam (RSS 1) dan serat TKKS mempengaruhi viskoelastik karet, dengan perubahan signifikan terhadap sifat mekanik seperti kekuatan tarik, ketahanan sobek, sifat mikroskopik dalam pengujian.