

**TESIS**

**Analisis Energi Impak Rompi Anti Peluru Komposit Serat  
Karbon Berpenguat Laminasi Aluminium**



**RUDI  
D022192008**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2022**

**TESIS**

**Analisis Energi Impak Rompi Anti Peluru Komposit Serat Karbon  
Berpenguat Laminasi Aluminium**

Disusun dan diajukan oleh :

**RUDI  
D022192008**

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister  
Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2022

# LEMBAR PENGESAHAN

## ANALISIS ENERGI IMPAK ROMPI ANTI PELURU KOMPOSIT SERAT KARBON BERPENGUAT LAMINASI ALUMINIUM

Disusun dan diajukan oleh

**RUDI**

**D022192008**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin  
pada tanggal 01 Maret 2022  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui  
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama

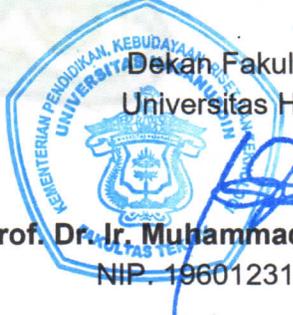
Pembimbing Pendamping

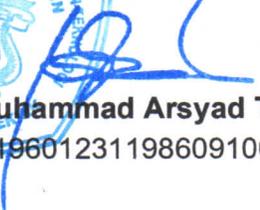
  
**Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T.**  
NIP. 197707072005111001

  
**Azwar Hayat, S.T., M.Sc., Ph.D**  
NIP. 198401262012121002

  
Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin

  
**Dr. Hairul Arsyad, ST., MT.**  
NIP. 197503222002121001

  
Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

  
**Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT.**  
NIP. 196012311986091001

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini ;

Nama : Rudi  
Nomor mahasiswa : D022192008  
Program studi : Teknik Mesin / Material

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 03 Maret 2022

Yang menyatakan

  
Rudi

## PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberi rahmat dan hidayah serta anugrah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan lancar. Salawat beriring salam semoga tetap tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Penulisan tesis dengan judul **“Analisis Energi Impak Rompi Anti Peluru Komposit Serat Karbon Berpenguat Laminasi Aluminium”** telah selesai dilaksanakan. Tesis ini merupakan salah satu syarat yang harus ditempuh untuk menyelesaikan pendidikan guna memperoleh gelar Magister Teknik (M.T) di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin tahun 2022.

Penulis menyadari selama penyusunan tesis ini telah melibatkan banyak pihak yang sangat membantu. Oleh karena itu, penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua penulis tercinta, Ayahanda H.Ambotuo dan Ibunda Hj.Mennang yang telah memberikan curahan kasih sayang, dukungan, semangat, motivasi dan doa kepada penulis.
2. Istri tercinta Rika, yang selalu memberi dukungan, semangat dan doa.

3. Ibu Prof.Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, M.A. selaku rektor Universitas Hasanuddin.
4. Pihak Pasca Sarjana Universitas Hasanuddin yang telah memberikan kesempatan kepada penulis dalam mengenyam Pendidikan Magister di Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tahun 2019.
5. Bapak Dr.Eng. Jalaluddin, S.T., M.T selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Bapak Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T selaku Ketua Program Studi S-2 Teknik Mesin.
7. Bapak Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing I yang juga telah memberikan waktu, arahan dan masukan selama penyusunan tesis ini.
8. Bapak Azwar Hayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktu, saran dan masukan selama penyusunan tesis ini.
9. Bapak/Ibu dosen dan staf Departemen Teknik Mesin atas bantuan dan motivasi yang telah diberikan selama 2 tahun terakhir.

10. Bapak Mayor Jenderal TNI Kunto Arief Wibowo selaku Panglima Divisi Infanteri 3/Kostrad yang telah mengizinkan pengujian balistik di lapangan tembak Kostrad.
11. Teman-teman Mahasiswa Magister Teknik Mesin khususnya angkatan 2019 tahun ajaran 2019/2020 akhir yang telah sama-sama berjuang dalam menuntut ilmu.
12. Injector 2012 yang tak hentinya memberikan semangat, bantuan dan motivasinya selama 9 tahun terakhir
13. Dinda-dinda junior Teknik mesin yang sudah memberikan bantuan teknis selama penyusunan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan keterbatasan pengetahuan penelitian sehingga dimungkinkan ada kekeliruan dan kesalahan yang tidak disengaja. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan guna perbaikan dan pengembangan lebih lanjut. Semoga tesis ini dapat bermanfaat dan memenuhi apa yang diharapkan.

Gowa, 01 Maret 2022

Penyusun

## ABSTRAK

Rompi merupakan sebuah media atau alat untuk melindungi tubuh pengguna dari ancaman yang berdampak pada cedera, luka, atau kondisi berbahaya lainnya. Walaupun penggunaan rompi tidak menjamin secara pasti keselamatan pengguna, namun penggunaannya dapat mengurangi risiko yang diakibatkan serangan benda tajam. Rompi telah mengalami perkembangan dan perbaikan mulai dari bentuk fisik menjadi lebih fleksibel dan lebih ringan. Semua ini didukung dengan adanya inovasi dan perbaikan terus menerus sehingga melahirkan sebuah alat pelindung diri dengan tingkat keamanan dan kenyamanan yang lebih baik dari sebelumnya. Para perancang telah melakukan berbagai inovasi-inovasi baru terhadap rompi yang tidak hanya berfokus pada satu aspek keamanan saja namun telah merambah ke berbagai aspek lain. Sebagai contoh, pembagian rompi kedalam tingkatan tertentu, nilai estetika rompi, pola dan bentuk, hingga pengguna yang diperuntukkan pada hewan peliharaan. Rompi anti peluru banyak digunakan oleh personil militer, untuk menjaga keselamatan dari serangan proyektil dan sebaran material ledakan. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan simulasi untuk mendapatkan jumlah lapisan serat karbon yang dapat menahan laju peluru. Setelah mendapatkan jumlah lapisan serat karbon yang dapat menahan laju peluru dilakukan validasi dengan melakukan pengujian balistik. Pengujian balistik dilakukan di Kostrad Divisi 3 Infanteri Kabupaten Gowa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jumlah lapisan serat karbon yang diperoleh dari pemodelan simulasi dapat menahan laju peluru. Kemudian, untuk mengoptimalkan rompi maka dilakukan pemodelan simulasi dengan memvariasikan posisi laminasi aluminium. Hasil simulasi menunjukkan bahwa posisi tengah laminasi aluminium memiliki kerusakan delaminasi yang paling kecil. Kemudian divalidasi dengan melakukan pengujian balistik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rompi tidak dapat menahan laju peluru sehingga rompi mengalami kerusakan delaminasi dan bugling pada aluminium.

Kata kunci : Rompi, FML, Balistik, Peluru, Impak

## ABSTRACT

Vest is a medium or tool to protect the user's body from threats that result in injury, injury, or other dangerous conditions. Although the use of a vest does not guarantee the safety of the user, its use can reduce the risk of being attacked by sharp objects. Vests have undergone developments and improvements ranging from physical form to being more flexible and lighter. All of this is supported by continuous innovation and improvement so as to give birth to a personal protective equipment with a level of safety and comfort that is better than before. The designers have made various new innovations to the vest that does not only focus on one aspect of safety but has penetrated to various other aspects. For example, the division of vests into certain levels, the aesthetic value of the vest, patterns and shapes, to the user intended for animal officers. Bulletproof vests are widely used by military personnel, to maintain safety from projectile attacks and the spread of explosive material. In this study, simulation modeling was carried out to obtain the number of layers of carbon fiber that could withstand the rate of bullets. After getting the number of layers of carbon fiber that can withstand the rate of bullets, validation is carried out by conducting ballistic tests. Ballistic testing was carried out at the Kostrad 3rd Infantry Division, Gowa Regency. The test results show that the number of layers of carbon fiber obtained from simulation modeling can withstand the rate of bullets. Then, to optimize the vest, simulation modeling was carried out by varying the position of the aluminum laminate. The simulation results show that the middle position of the aluminum laminate has the smallest delamination damage. Then validated by performing ballistic testing. The test results show that the vest cannot withstand the bullets so that the vest suffers from delamination and bugling damage to the aluminum.

*Keywords: Vest, FML, Ballistics, Bullets, Impact*

## DAFTAR ISI

halaman

PRAKATA.....	i
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT .....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	5
1.5 Batasan Masalah .....	5
1.6 Metode Penelitian .....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	8
2.1 Komposit.....	8
2.2 CARALL.....	17
2.2.1 Serat Karbon .....	18
2.3 Rompi Anti Peluru .....	21
2.3.1 Peluru.....	25
2.3.2 Uji Tembak.....	26

2.4 Metode Elemen Hingga .....	28
2.4.1 Software Abaqus .....	30
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>34</b>
3.1 Alat dan Bahan .....	34
3.1.1 Alat.....	34
3.1.2 Bahan .....	36
3.2 Prosedur Penelitian .....	39
3.2.1 Pembuatan Model Simulasi .....	40
3.2.2 Pengkondisian Model Simulasi.....	40
3.2.3 Pembuatan Rompi Komposit.....	45
3.2.4 Pelaksanaan Uji Tembak.....	47
3.3 Tempat Dan Waktu .....	48
3.3.1 Tempat .....	48
3.3.2 Waktu .....	48
3.4 Alur Penelitian.....	50
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>52</b>
4.1 Hasil dan Pembahasan Data Pemodelan Simulasi .....	52
4.2 Hasil dan Pembahasan Data Eksperimen .....	61
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>71</b>
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran .....	72
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>73</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>		<b>halaman</b>
2.1	Sifat mekanik serat karbon dan serat lain.....	19
2.2	NIJ Standar 0101.04 P-BFS <i>performance test summary</i> .....	24
2.3	Keterangan level kaliber NIJ Standard .....	26
3.1	Jadwal Waktu dan Kegiatan Penelitian .....	48
4.1	Penyerapan energi kinetik rompi .....	55
4.2	Perbandingan bobot dan ketebalan rompi.....	65
4.3	Perbandingan sifat mekanis rompi CFRP dan CARALL .....	67

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>halaman</b>
2.1 Klasifikasi komposit.....	10
2.2 Klasifikasi komposit berdasarkan penguatnya.....	11
2.3 Komposit partikel.....	11
2.4 Komposit serat.....	12
2.5 Macam arah serat komposit.....	14
2.6 Komposit berlapis.....	15
2.7 Ilustrasi komposit berdasarkan strukturnya.....	15
2.8 Aplikasi serat karbon.....	19
2.9 <i>Soft body armour</i> .....	22
2.10 <i>Hard body armour</i> dan panel.....	23
2.11 Peluru caliber 9mm x 19mm.....	25
2.12 Ilustrasi gaya yang diteruskan oleh peluru ke benda uji.....	27
2.13 Ilustrasi terjadinya retakan oleh peluru ke benda uji.....	28
2.14 Hasil simulasi komputasi pada aplikasi abaqus.....	31
3.1 Timbangan digital.....	34
3.2 Pompa vakum.....	34
3.3 G2 Kal.9mm.....	35
3.4 <i>Software Abaqus</i> .....	35
3.5 Aluminium 1100.....	36
3.6 Resin Epoxy.....	36

3.7	Serat karbon tipe Twill 3K .....	37
3.8	Selang plastic bening .....	37
3.9	Plastik .....	38
3.10	Kain.....	38
3.11	Media <i>flow</i> .....	38
3.12	Kaca bening .....	39
3.13	<i>Wax/Kit</i> .....	39
3.14	Model peluru dan pelat CFRP .....	40
3.15	Sifat-sifat material .....	41
3.16	Hasil meshing model peluru dan pelat CFRP .....	42
3.17	Penentuan fixed support, massa dan kecepatan peluru .....	44
3.18	Diagram Alir .....	50
4.1	Rompi dengan variasi ketebalan .....	54
4.2	Penurunan energi kinetik peluru.....	55
4.3	Nilai penurunan energi kinetik peluru .....	57
4.4	Peningkatan energi internal rompi.....	58
4.5	Nilai peningkatan energi internal rompi .....	59
4.6	Penurunan kecepatan peluru .....	59
4.7	Nilai penurunan kecepatan peluru .....	61
4.8	Spesimen serat karbon berpenguat plastic.....	62
4.9	Hasil pengujian balistik rompi anti peluru .....	62
4.10	Perbandingan kerusakan urutan penembakan .....	64
4.11	Posisi lapisan aluminium .....	66

4.12	Spesimen komposit serat karbon laminasi aluminium tengah...	68
4.13	Spesimen rompi anti peluru setelah pengujian tembak .....	69
4.14	Kerusakan rompi akibat impak balistik .....	70

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>lampiran</b>		<b>halaman</b>
1	National Institute of Justice Standart .....	75
2	Sifat mekanik CFRP untuk model UMAT Abaqus Explicit.....	81
3	Proses produksi rompi .....	82
4	Pengujian balistik .....	85
5	Hasil data perhitungan .....	86

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Rompi merupakan sebuah media atau alat untuk melindungi tubuh pengguna dari ancaman yang berdampak pada cedera, luka, atau kondisi berbahaya lainnya. Walaupun penggunaan rompi tidak menjamin secara pasti keselamatan pengguna, namun penggunaannya dapat mengurangi risiko yang diakibatkan serangan benda tajam. Rompi telah mengalami perkembangan dan perbaikan mulai dari bentuk fisik menjadi lebih fleksibel dan lebih ringan. Semua ini didukung dengan adanya inovasi dan perbaikan terus menerus sehingga melahirkan sebuah alat pelindung diri dengan tingkat keamanan dan kenyamanan yang lebih baik dari sebelumnya (Pulungan et al., 2019). Para perancang telah melakukan berbagai inovasi-inovasi baru terhadap rompi yang tidak hanya berfokus pada satu aspek keamanan saja namun telah merambah ke berbagai aspek lain. Sebagai contoh, pembagian rompi kedalam tingkatan tertentu, nilai estetika rompi, pola dan bentuk, hingga pengguna yang diperuntukkan pada hewan peliharaan. Rompi anti peluru banyak digunakan oleh personel militer, untuk menjaga keselamatan dari serangan proyektil dan sebaran material ledakan (Purnomo,H. et al., 2018). Bahan yang

dulunya murni menggunakan material logam sekarang menggunakan kombinasi antara serat dan material logam dengan fungsi yang telah disesuaikan dengan kebutuhan, serta jenis yang lebih yang lebih bervariasi dan menyesuaikan dengan kebutuhan pengguna dilapangan.

Salah satu pengganti bahan rompi anti peluru adalah komposit. Komposit merupakan penggabungan dua jenis bahan yang memiliki sifat berbeda. Penggabungan kedua sifat ini diharapkan mampu melahirkan sifat baru. *Fiber Metal Laminate* (FML) adalah satu dari sekian banyak jenis komposit saat ini. FML umumnya terdiri dari lapisan serat hibrida (serak karbon, serat gelas,dll) dan lapisan tipis logam (aluminium,titanium,dll) (Purnomo,H. et al., 2018). Beberapa penelitian telah dilakukan guna meningkatkan kemampuan komposit FML dalam aplikasi penyerapan energi impak.

Penelitian tentang pengaruh struktur *carbon fiber reinforced aluminium laminate* (CARALL) terhadap respon dinamik dan karakteristik kegagalan telah dilakukan oleh Dhaliwal dkk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan struktur CARALL mempengaruhi CARALL dalam penyerapan energi. CARALL dengan struktur *carbon fiber outer* memiliki penyerapan energi yang lebih baik dibandingkan dengan CARALL dengan struktur *aluminium outer* (Dhaliwal & Newaz, 2016).

Rajan dkk. telah melakukan penelitian tentang karakteristik kerusakan dan respon impak *Carbon Fibre Reinforced Aluminium Laminate* (CARALL) pada pengujian impak kecepatan rendah. Bahan penelitian yang digunakan adalah epoxy resin, lembaran aluminium tebal 0.3 mm dan serat karbon 300 gsm. Hasil penelitian tersebut diketahui bahwa sifat impak meningkat dengan peningkatan jumlah lapisan pada CARALL. (Rajan et al., 2018)

Yu dkk. menganalisa pengaruh jenis aluminium yang digunakan pada struktur *CARALL* terhadap ketahanan impak. Penelitian menunjukkan bahwa ketahanan impak *CARALL* meningkat seiring dengan peningkatan sifat mekanik aluminium (*yield strength*) yang digunakan. (Yu et al., 2015)

Pulungan dkk. melakukan penelitian tentang rompi anti peluru yang terbuat dari komposit serat karbon dan *Hollow Glass Microsphere* (HGM) dalam menyerap energi yang disebabkan oleh impak peluru. Dalam penelitian tersebut dilakukan variasi ketebalan komposit guna mendapatkan ketebalan rompi yang ideal dalam menyerap dan melepaskan energi sehingga tidak mencederai pengguna rompi. Hasil penelitian mengatakan bahwa rompi dengan ketebalan 20 mm melepaskan energi 138.77J dimana angka tersebut masuk kategori aman dalam penggunaan rompi anti peluru. (Pulungan et al., 2019)

Berdasarkan latar belakang yang sudah dipaparkan, pada penelitian ini akan dilakukan analisis energi impak rompi anti peluru komposit serat karbon berpenguat laminasi aluminium.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh jumlah lapisan komposit polimer berpenguat serat karbon terhadap kekuatan impak balistik menggunakan simulasi numerik metode elemen hingga dan eksperimen?
2. Bagaimana pengaruh pengujian balistik terhadap kerusakan material komposit polimer berpenguat serat karbon?
3. Bagaimana pengaruh struktur lapisan komposit polimer berpenguat serat karbon dan laminasi aluminium (*CARALL*) terhadap kekuatan impak balistik menggunakan simulasi numerik metode elemen hingga dan eksperimen?
4. Bagaimana pengaruh pengujian balistik terhadap kerusakan material serat karbon berpenguat laminasi aluminium (*CARALL*)?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisa pengaruh jumlah lapisan komposit polimer berpenguat serat karbon terhadap kekuatan impak balistik menggunakan simulasi numerik metode elemen hingga dan eksperimen.

2. Menganalisa pengaruh pengujian balistik terhadap kerusakan material komposit polimer berpenguat serat karbon.
3. Menganalisa pengaruh struktur lapisan komposit polimer berpenguat serat karbon dan laminasi aluminium (CARALL) terhadap kekuatan impak balistik menggunakan simulasi numerik metode elemen hingga dan eksperimen.
4. Menganalisa pengaruh pengujian balistik terhadap kerusakan material serat karbon berpenguat laminasi aluminium (CARALL).

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Memberikan gambaran secara kualitatif dan kuantitatif bagaimana perpaduan kekuatan impak serat karbon dan aluminium.
2. Dapat menjadi tabel tambahan untuk memberikan keamanan serta fleksibilitas demi mendukung pergerakan saat pemakaian.
3. Dapat memberikan sumbangsih hasil riset penelitian dalam perkembangan referensi rancangan rompi anti peluru khususnya pada dunia permiliteran Indonesia.

#### **1.5 Batasan Masalah**

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa batasan masalah sebagai berikut :

1. Properties material yang digunakan merupakan properties dari serat karbon dan lembaran aluminium dianggap homogen.
2. Serat karbon yang digunakan adalah serat karbon tipe Twill 3K

3. Ketebalan aluminium yang digunakan sama, yaitu 1 mm.
4. Aluminium yang digunakan pada penelitian ini yaitu Aluminium 1100.
5. Variasi jumlah lapisan komposit polimer berpenguat serat karbon yaitu 10 lapis, 15 lapis, 20 lapis, 25 lapis dan 30 lapis.
6. Variasi posisi laminasi aluminium yaitu posisi depan, tengah dan belakang.
7. Permukaan pada lembaran aluminium tidak dilakukan perlakuan.
8. Pemodelan simulasi menggunakan Abaqus Explicit VUMAT
9. Pengujian balistik menggunakan Pistol G2 buatan Pindad diameter peluru 9mm.
10. Pengujian dilakukan untuk memvalidasi hasil pemodelan simulasi peluru (simulasi dan eksperimen).
11. Pengujian balistik pada rompi anti peluru yang terbuat dari komposit serat karbon berpenguat laminasi aluminium berdasarkan standar pengujian NIJ Standard 0101.06
12. Hatcher's Notebook (1962) by Major General Julian S. Hatcher, a U.S Army ordnance expert menyatakan energi diatas 170 joule dapat menyebabkan cedera pada tubuh manusia.

#### **1.6 Metode Penelitian**

Adapun metode yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini yaitu:

1. Metode eksperimen yaitu merupakan metode yang digunakan pada saat proses penelitian untuk mendapatkan data-data yang

dibutuhkan guna melengkapi penulisan. Proses ini meliputi simulasi komputasi, setelah diperoleh pemodelan yang ideal selanjutnya dibuat benda uji untuk dilakukan pengujian impak peluru guna mengkonfirmasi hasil komputasi.

2. Kajian pustaka yaitu dengan mengumpulkan referensi yang berhubungan dengan masalah yang akan dianalisa melalui perpustakaan, jurnal dan internet

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Komposit**

Komposit adalah suatu sistem yang tersusun melalui pencampuran dua material atau lebih yang berbeda, dalam bentuk dan komposisi material yang tidak larut satu sama lain. Pada umumnya bahan komposit adalah bahan yang memiliki beberapa sifat yang tidak mungkin dimiliki oleh masing-masing komponennya. Dalam pengertian ini sudah tentu kombinasi tersebut tidak terbatas pada bahan matriknya. Kata komposit berasal dari kata “to compose” yang berarti menyusun atau menggabung. Secara sederhana material komposit adalah material gabungan dari dua atau lebih material yang berlainan. Jadi komposit adalah suatu bahan yang merupakan gabungan atau campuran dari beberapa material pada skala makroskopis untuk membentuk material ketiga yang lebih bermanfaat (Fajri et al., 2013).

Beberapa definisi komposit menurut (Nayiroh, 2013) sebagai berikut :

- Tingkat dasar : pada molekul tunggal dan kisi kristal, bila material yang disusun dari dua atom atau lebih disebut komposit (contoh senyawa, paduan, polymer dan keramik)

- Mikrostruktur : pada kristal, phase dan senyawa, bila material disusun dari dua phase atau senyawa atau lebih disebut komposit (contoh paduan Fe dan C)
- Makrostruktur : material yang disusun dari campuran dua atau lebih penyusun makro yang berbeda dalam bentuk dan/atau komposisi dan tidak larut satu dengan yang lain disebut material komposit (definisi secara makro ini yang biasa dipakai)

Komposit pada umumnya terdiri dari 2 fasa menurut (Pulungan, 2017):

#### 1. Matriks

Matriks dalam komposit berfungsi sebagai bahan mengikat serat menjadi sebuah unit struktur, melindungi dari perusakan eksternal, meneruskan atau memindahkan beban eksternal pada bidang geser antara serat dan matriks, sehingga matriks dan serat saling berhubungan.

#### 2. Penguat

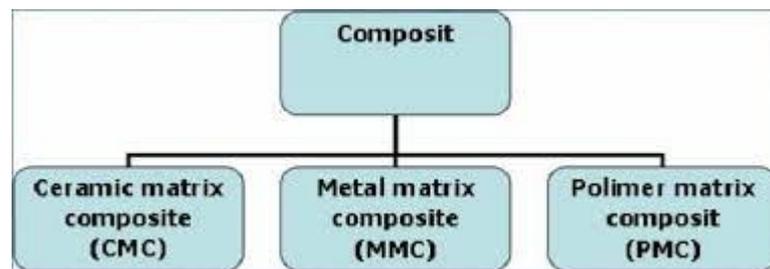
Salah satu bagian utama dari komposit adalah reinforcement (penguat) yang berfungsi sebagai penanggung beban utama pada komposit.

Material komposit dapat dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu

## 1. Klasifikasi komposit

A. Berdasarkan matrik, komposit dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok besar menurut (Nayiroh, 2013) yaitu :

- a. MMC : *Metal Matriks Composite* , logam sebagai matrik
- b. CMC : *Ceramic Matriks Composite*, keramik sebagai matrik
- c. PMC : *Polymer Matriks Composite*, polimer sebagai matrik

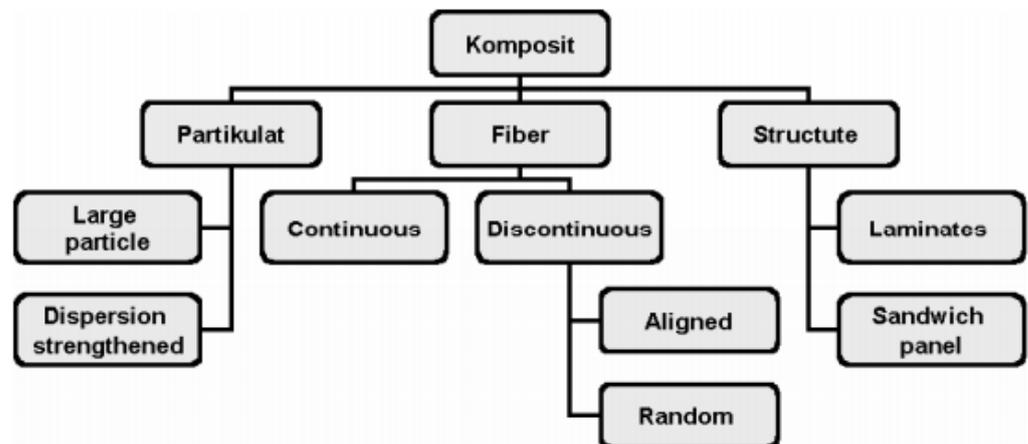


Gambar 2.1 : Klasifikasi komposit (Savitri, 2018)

Matriks polimer yang paling umum digunakan pada material komposit, karena memiliki sifat yang lebih tahan karat, korosi dan lebih ringan. Matriks polimer terbagi 2 yaitu termoplastik dan termoset. Perbedaannya polimer termoset tidak dapat didaur ulang sedangkan termoplastik dapat didaur ulang sehingga lebih banyak digunakan belakangan ini. Jenis termoplastik yang biasa digunakan : polypropylene (PP), polystyrene (PS), polyethylene (PE), dll

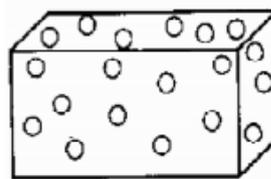
## B. Klasifikasi berdasarkan penguatnya

Klasifikasi komposit berdasarkan penguatnya dapat dilihat pada gambar 2.2



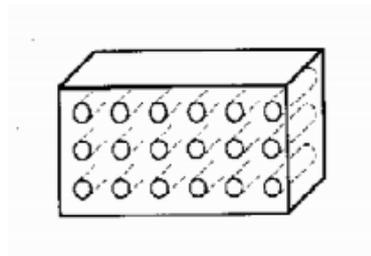
Gambar 2.2 : Pembagian komposit berdasarkan penguat (Nayiroh, 2013)

1. *Particulate Composite Materials* (komposit partikel) merupakan jenis Komposit yang menggunakan partikel/butiran sebagai filler (pengisi). Partikel berupa logam atau non logam dapat digunakan sebagai filler. Gambar komposit partikel dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 : Komposit partikel (Nayiroh, 2013)

2. *Fibrous Composite Materials* (komposit serat) terdiri dari dua komposit penyusun yaitu matriks dan serat. Gambar komposit serat dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 : Komposit serat (Nayiroh, 2013)

Fungsi utama dari serat adalah sebagai penopang kekuatan dari komposit, sehingga tinggi rendahnya kekuatan komposit sangat tergantung dari serat yang digunakan, karena tegangan yang dikenakan pada komposit mulanya diterima oleh matrik akan diteruskan kepada serat, sehingga serat akan menahan beban sampai beban maksimum. Oleh karena itu serat harus mempunyai tegangan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada matrik penyusun komposit. Fiber yang digunakan harus memiliki syarat sebagai berikut :

- Mempunyai diameter yang lebih kecil dari diameter bulknya (matriksnya) namun harus lebih kuat dari bulknya
- Harus mempunyai tensile strength yang tinggi

Kebutuhan akan penempatan serat tabel12c12 serat yang berbeda menjadikan komposit diperkuat serat dibedakan lagi

menjadi beberapa bagian. Berdasarkan penempatannya, ada beberapa tipe arah serat pada komposit (Pulungan, 2017):

a. *Continuous fibre composit*

*Continuous fibre composit* mempunyai susunan serat tabel13c dan lurus, membentuk lamina diantara matriksnya. Jenis arah serat ini paling sering digunakan. Tipe ini mempunyai kelemahan pada pemisahan antar lapisan. Hal ini dikarenakan kekuatan antar lapisan dipengaruhi oleh matriksnya.

b. *Woven fibre composit*

Arah serat komposit tipe ini tidak mudah dipengaruhi pemisahan antar lapisan karena susunan seratnya juga mengikat antar lapisan. Akan tetapi susunan serat memanjangnya yang tidak begitu lurus mengakibatkan kekuatan dan kekakuan akan melemah.

c. *Discontinuous fibre composit*

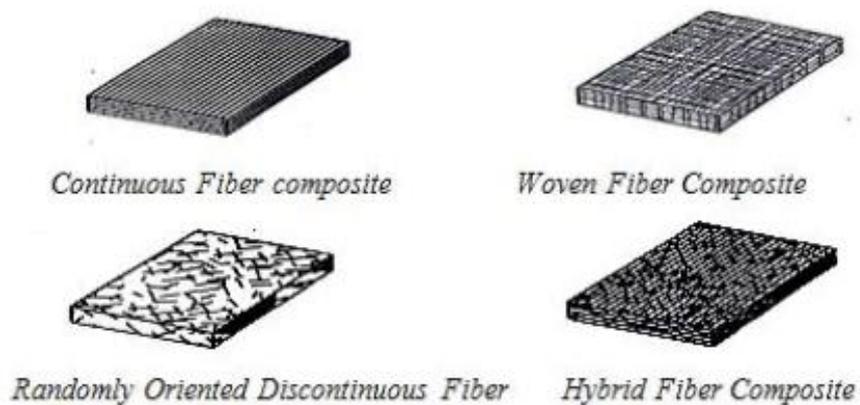
*Discontinuous fibre composit* adalah tipe komposit dengan serat pendek. Tipe ini dibedakan lagi menjadi 3 (Pulungan, 2017):

1. Aligned discontinuos fiber
2. Off-axis aligned discontinuous fiber
3. Randomly oriented discontinuos fiber

Tipe acak sering digunakan pada produksi dengan volume besar karena biaya produksinya yang lebih murah. Kekurangan dari jenis serat acak adalah sifat mekanik yang masih dibawah dari penguatan dengan serat lurus pada jenis serat yang sama.

d. *Hybrid fiber composit*

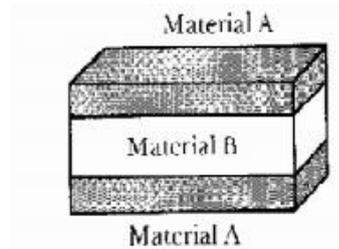
Tipe arah serat komposit ini merupakan gabungan antara tipe serat lurus dengan serat acak. Cara ini digunakan untuk mengantisipasi kekurangan dari kedua tipe arah serat tersebut. Gambar komposit tipe arah serat komposit dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 : Macam arah serat komposit (Pulungan, 2017)

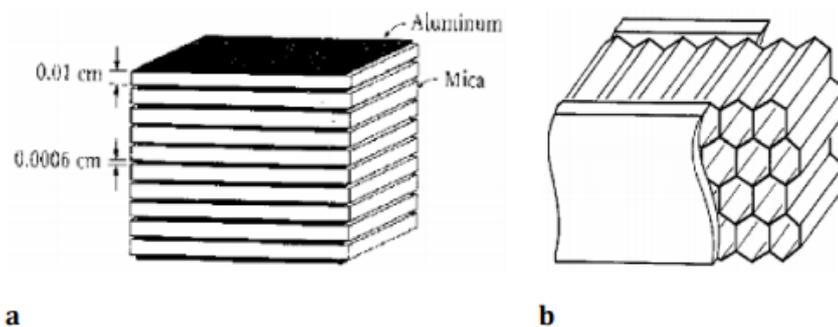
3. *Structural Composite Materials* (komposit berlapis) terdiri dari sekurang-kurangnya dua material berbeda yang direkatkan bersama-sama. Proses pelapisan dilakukan dengan mengkombinasikan aspek terbaik dari masing-masing lapisan

untuk memperoleh bahan yang berguna. Gambar komposit berlapis dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 : Komposit berlapis (Nayiroh, 2013)

Berdasarkan struktur, komposit dapat dibagi menjadi dua yaitu struktur *laminat* dan struktur *sandwich*, ilustrasi dari kedua struktur komposit tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 : Ilustrasi komposit berdasarkan strukturnya :  
a. Struktur *laminat* b. *Sandwich panel* (Nayiroh, 2013)

Menurut (Pulungan, 2017) ada beberapa kelebihan dan kekurangan dari komposit apabila dibandingkan dengan material konvensional antara lain:

a. Kelebihan material komposit:

1. Material komposit mampu berperan sebagai terintegrasi sifat, misalnya satu komposit mampu menggantikan peran dari beberapa material logam.
  2. Komposit memiliki berat jenis rasio yang baik. Rasionya 1/5 dari baja dan 1/2 aluminium.
  3. Komposit memiliki strength-to-density rasio yang baik. Kelebihan ini apabila digunakan sebagai bahan konstruksi pesawat atau kendaraan bermotor bisa lebih efisien dalam hal bisa bergerak lebih cepat, bahan bakar yang lebih irit karena material lebih ringan dibandingkan dengan logam. Kekuatan spesifiknya komposit ini hingga 3:5 lebih baik jika dibandingkan dengan baja.
  4. Tahan torsi (fatigue strength) dari komposit baik. Untuk paduan aluminium maupun baja tahan torsi berada pada 50% dari nilai static strength, sementara untuk unidirectional carbon/epoxy composite bisa mencapai 90% dari static strength.
- b. Kekurangan material komposit
1. Banyak komposit yang bersifat anisotropik, di mana terjadi perbedaan sifat yang tergantung pada arah komposit diukur.
  2. Banyak komposit berbasis polimer yang menjadi subjek serangan bahan kimia atau bahan pelarut, polimer rentan terkena serangan bahan kimia.
  3. Secara umum material komposit itu mahal.
  4. Proses pembuatan dan pembentukan material komposit lambat.

## 2.2 CARALL

Menurut (Xue, 2012) pada tahap awal kajian dari *Fiber Metal Laminate (FML)*, *carbon fiber reinforced plastic (CFRP)* juga dianggap sebagai lapisan komposit potensial untuk memperkuat paduan aluminium, karena CFRP memiliki keunggulan yang lebih baik dari *aramid fiber reinforced plastic (AFRP)* dan *glass fiber reinforced plastic (GFRP)* seperti kekakuan dan kekuatan spesifik. Kekakuan tinggi dari serat karbon dapat memberikan *crack bridging* yang lebih efisien ke lapisan aluminium dibandingkan *aramid fiber* dan *glass fiber* dan keberadaan lapisan aluminium memberikan ketahanan benturan yang baik. Kombinasi antara kekakuan dan kekuatan dengan ketahanan benturan yang baik menjadikan *carbon fiber reinforced aluminium laminate (CARALL)* cocok untuk aplikasi pada struktur pesawat, ruang angkasa, helicopter, robot, pipa laminasi, poros penggerak dan lain sebagainya. Oleh karena itu, banyak peneliti telah melakukan banyak upaya untuk mengembangkan *CARALL* selama beberapa tahun terakhir.

Penelitian tentang perancangan, pengembangan dan pengujian material *CARALL* untuk penggunaan pesawat ruang angkasa telah dilakukan oleh Bilal dkk. Dalam penelitian penelitian tersebut, mereka menemukan bahwa penambahan *adhesive* dapat meningkatkan kekuatan tarik *CARALL*. (Bilal et al., 2015)

Sifat material dan ketebalan laminasi mempengaruhi dinamika tumbukan. Karakteristik proyektil – termasuk berat, bentuk, sifat elastis, dan sudut datangnya adalah parameter lain yang harus dipertimbangkan. Aplikasi material komposit menjadi semakin populer, terutama pada struktur dirgantara. Keuntungan penggunaan komposit pada struktur pesawat terbang adalah; pengurangan berat badan, ketahanan korosi tinggi dan ketahanan tinggi terhadap kerusakan akibat kelelahan. Faktor-faktor ini berperan dalam mengurangi biaya operasi pesawat dalam jangka panjang, yang selanjutnya meningkatkan efisiensinya (Safri et al., 2014).

### **2.2.1 Serat Karbon**

Serat karbon merupakan salah satu bentuk material komposit. Material komposit, yang diambil dari istilah Bahasa Inggris composition materials atau dipendekkan menjadi composite materials, adalah suatu material yang dibuat dari dua atau lebih material penyusun yang saling memiliki perbedaan sifat fisik dan kimia, yang jika dikombinasikan akan menghasilkan material berkarakteristik berbeda dengan material-material penyusunnya. Komposit serat karbon merupakan salah satu jenis material komposit yang menggunakan serat karbon sebagai salah satu penyusunnya (*Teknologi Komposit Serat Karbon | | Artikel Teknologi Indonesia*, n.d.).



Gambar 2.8 : Aplikasi serat karbon

Sifat mekanik dari serat karbon dan beberapa serat lainnya bisa kita lihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Sifat mekanik beberapa serat (Shubhra et al., 2013)

Fiber	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Refs
Cotton	330–585	4.5–12.6	1.5–1.54	119
Flax	345–1035	27.6–45.0	1.43–1.52	119
Hemp	690–1000	50.0	1.47–1.50	119
Jute	393–800	13–26.5	1.3–1.45	82
Silk	650–750	16	1.3–1.38	82
Kenaf	930	53.0	1.5	119
Ramie	400–1000	61.5	1.5–1.6	119
Sisal	511–635	9.4–15.8	1.16–1.5	119
Banana	500–700	7–20	1.4	120
Softwood	100–170	10–50	1.4	120
Hardwood	90–180	10–70	1.4	120
E-glass	1800	69.0–73.0	2.5	119
HM carbon	2400	380	1.95	121,122
HS carbon	3400	230	1.75	121,122
Kevlar 49	3000	130	1.45	121,122

HM: high modulus, HS: high strength.

Sifat dari serat karbon dipengaruhi oleh beberapa faktor. Satu faktor yang paling utama adalah arah atau alur serat karbon. Berbeda dengan material logam, karbon fiber khususnya dan material komposit lain pada umumnya, disebut sebagai material anisotropik. Maksudnya adalah sifat properti material ini dipengaruhi oleh bentuk dan arah serat penyusunnya. Sehingga kekuatan serat karbon bergantung pada bentuk dan arah serat penyusunnya. Di sisi lain material seperti logam, plastik, dan lainnya memiliki sifat yang tetap sekalipun bentuk dan arah butir-butir molekulnya berbeda-beda. Karena itulah material-material ini disebut material isentropik.

Karbon merupakan material dengan performa sangat baik dan paling banyak digunakan sebagai penguat dalam komposit polimer karena:

- a. Serat karbon memiliki specific modulus dan specific strength yang paling tinggi diantara semua serat penguat.
- b. Serat karbon tetap memiliki tensile modulus dan strength yang tinggi pada temperature tinggi, meskipun pada temperature tinggi ada masalah oksidasi.
- c. Pada temperature kamar, serat karbon tidak dipengaruhi oleh uap air, berbagai solven, asam dan basa.
- d. Serat karbon memiliki karakteristik fisik dan mekanik yang sangat beragam, sehingga komposit yang terbuat dengan serat karbon dapat memiliki sifat beragam, sesuai dengan yang diinginkan.

## 2.3 Rompi Anti Peluru

Suarjan dan Wid menjelaskan rompi anti peluru merupakan baju pelindung yang digunakan di dalam dunia militer. Rompi tersebut digunakan untuk melindungi badan bagian dada, perut, dan punggung. Organ-organ vital manusia terletak diantara punggung dan dada seperti jantung, hati, paru-paru, organ-organ pencernaan dan ginjal. Dimana organ-organ tersebut apabila terjadi kerusakan dapat berakibat fatal dan bahkan mengalami kehilangan nyawa seketika. (Suarjan & Wid, 2020)

Pada abad pertengahan, Jepang menggunakan rompi anti peluru berbahan sutera. Tahun 1960 National Institute of Justice mengembangkan rompi anti peluru dengan bahan serat tabel 21. Army's Edgewood Arsenal juga mengembangkan rompi anti peluru dengan serat berlapis yaitu sebanyak tujuh lapis, namun rompi tersebut mengalami penurunan daya tahan ketika basah, dicuci berulang ataupun terpapar sinar matahari. Pada penelitian yang dilakukan Tasdemirci, dkk., (2011) menunjukkan bahwa energi yang mampu diserap oleh rompi anti peluru yang terbuat dari paling tinggi adalah sebesar 27 Joule dengan model yang tidak disisipi apapun. Berikut rompi anti peluru dibedakan menjadi dua adalah:

### 1. *Soft body armor*

Soft body armor umumnya terbuat dari serat aromatic polyamide (aramid). Aramid memiliki struktur yang kuat (tough), memiliki

sifat peredam yang bagus (vibration damping), tahan terhadap asam (acid) dan basa (leach), serta dapat menahan panas hingga 370°C. Aramid biasa juga disebut Kevlar. Satu lapisan kevlar memiliki ketebalan 0.25 mm, umumnya standar rompi terdiri hingga 32 lapisan dengan berat mencapai 10 kg (Pulungan, 2017). Rompi ini cenderung lebih ringan sehingga menguntungkan untuk digunakan dalam tugas-tugas penyamaran, atau pengamanan bagi personel intelijen. Gambar 2.9 menunjukkan model rompi Soft Body Armor.



Gambar 2.9 : *Soft body armour* (Pulungan, 2017)

Soft body armour dapat menahan laju peluru pada level IIA, level II dan level IIIA. Umumnya senjata pada level tersebut merupakan senjata pistol dan *handgun*. Jadi dalam penggunaan soft body armour harus diperhatikan dalam penggunaannya. Tugas yang akan dilaksanakan, tingkat ancaman yang akan dihadapi, dan jenis senjata yang mungkin akan tidak sesuai dengan kemampuan soft body armour.

## 2. *Hard Body Armour*

Dengan menambahi soft body armor dengan lapisan tertentu, dapat dihasilkan hard body armor seperti Gambar 2.2. Umumnya lapisan terbuat dari keramik ( $Al_2O_3$  "Alumina"), lempengan logam atau komposit. Bentuknya yang tebal dan berat menjadikannya tidak nyaman, hingga jarang dikenakan dalam tugas keseharian. Rompi anti peluru ini sering digunakan dalam tugas khusus yang beresiko tinggi, seperti operasi militer.



Gambar 2.10 : *Hard body armour* dan panel (Pulungan, 2017)

Setiap peralatan militer pasti memiliki standar penggunaan yang harus diterapkan untuk mengetahui seberapa kemampuan minimal dan maksimal dari peralatan tersebut, seperti standar uji pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 NIJ Standar 0101.04 P-BFS performance test summary

Test Variables			Performance Requirements								
Armor Type	Test Round	Test Bullet	Bullet Weight	Reference Velocity ( $\pm 30$ ft/s)	Hits Per Armor Part at 0° Angle of Incidence	BFS Depth Maximum	Hits Per Armor Part at 30° Angle of Incidence	Shots Per Panel	Shots Per Sample	Shots Per Threat	Total Shots Req'd
I	1	.22 caliber LR LRN	2.6 g 40 gr.	329 m/s (1080 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	.380 ACP FMJ RN	6.2 g 95 gr.	322 m/s (1055 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g 124 gr.	341 m/s (1120 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	40 S&W FMJ	11.7 g 180 gr.	322 m/s (1055 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g 124 gr.	367 m/s (1205 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	357 Mag JSP	10.2 g 158 gr.	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
IIIA	1	9 mm FMJ RN	8.2 g 124 gr.	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	44 Mag SHP	15.6 g 240 gr.	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g 148 gr.	847 m/s (2780 ft/s)	6	44 mm (1.73 in)	0	6	12	12	12
IV	1	.30 caliber M2 AP	10.8 g 166 gr.	878 m/s (2880 ft/s)	1	44 mm (1.73 in)	0	1	2	2	2
Special	*	*	*	*	*	44 mm (1.73 in)	*	*	*	*	*

\*User Specified

Panel = Front or back component of typical armor sample.  
 Sample = Full armor garment, including all component panels (F & B).  
 Threat = Test ammunition round by caliber.

Sumber : (NIJ Standard-0101.06, 2008)

### 2.3.1 Peluru

Pulungan dkk. menjelaskan peluru merupakan objek proyektil yang ditembakkan dengan senjata api. Pada zaman dulu peluru terbuat dari tanah liat yang digunakan sebagai amunisi ketapel untuk berburu. Tahun 1500-1800 peluru berubah sedikit dimana bentuknya menjadi lebih bundar (Pulungan, 2017). Tahun 1847 Claude-Etienne Minie menemukan peluru dengan bentuk kerucut berlubang. Dimana lubang tersebut diisi dengan smokeless powder ammunition. Ujung peluru dapat meleleh ketika bergesekan dengan bore senjata api ataupun terkena gas panas dari belakang akibat pembakaran powder ammunition. Pada saat ini peluru terbuat dari paduan timah dan tin yang memiliki kecepatan tinggi. Gambar 2.11 menunjukkan jenis peluru kaliber 9 mm x 19 mm.



Gambar 2.11 : Peluru kaliber 9mm x 19mm (Wordpress, 2013)

Standar peluru balistik yang paling banyak digunakan adalah standar NIJ (National Institute of Justice) Amerika. Berdasarkan standar

ini, peluru balistik dibagi menjadi beberapa tingkatan (level), yaitu level I, II-A, II, III-A, III, dan IV. Level I adalah tingkatan yang terendah. Lengkapnya lihat Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Keterangan level caliber NIJ Standard

level	Caliber	NIJ Standard 0101.04 Velocities
Level IIA	9mm 124 gr. FMJ RN .40 Caliber 180 gr. FMJ	1120 ft/s 1055 ft/s
Level II	9mm 124 gr. FMJ RN .357 Magnum 158 gr. JSP	1205 ft/s 1430 ft/s
Level IIIA	9mm 124 gr. FMJ RN .44 Magnum 240 gr. JHP	1430 ft/s 1430 ft/s
Level III	7.62mm NATO 148 gr. (.308 Caliber) FMJ	2780 ft/s
Level IV	30.06 166 gr. (.30 Caliber) M2AP Armor Piercing	2680 ft/s

Sumber : (NIJ Standard-0101.06, 2008)

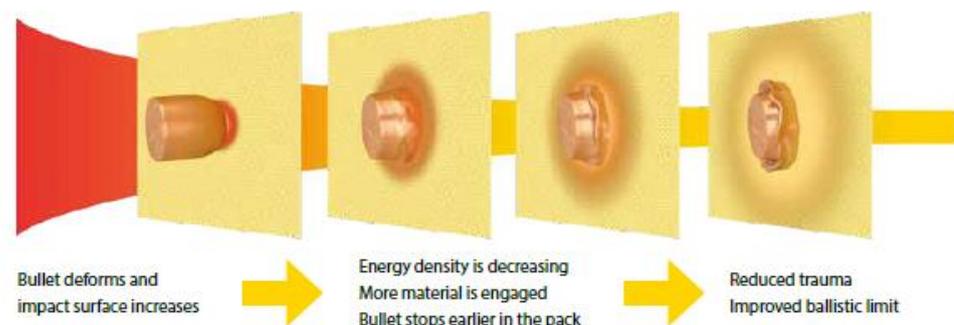
### 2.3.2 Uji tembak

Uji tembak peluru adalah kegiatan yang bertujuan untuk memastikan apakah fungsi dari sebuah produk resistance/tahan peluru sudah sesuai dengan standar yang diinginkan atau tidak, dalam menahan tembakan peluru (Anakottapary et al., 2012). Pengujian ini harus dilakukan oleh pihak yang berwenang dibidangnya untuk melegalkan hasil pengujian nantinya. Pada penelitian ini balistik panel dibuat dengan ukuran 24cm x 18cm yang terbuat dari plastic yang diperkuat serat karbon.

Standar pengujian yang digunakan yaitu menggunakan tipe III-A, NIJ 0101.04 dengan tipe peluru yaitu 44 Magnum Lead SWC dan 9 mm

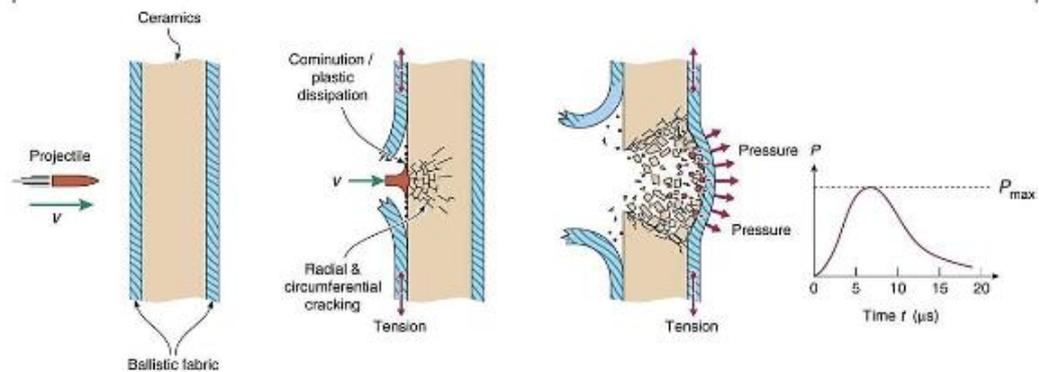
FMJ, nominal massa peluru sebesar 8,1 g, minimum kecepatan peluru sebesar 376 m/s. Langkah pertama saat pengujian yaitu meletakkan spesimen uji dengan jarak sejauh 10 meter dari senjata penembak. Jarak ini merupakan jarak terdekat tempur antara yang menggunakan senjata api. Langkah berikutnya jika spesimen uji sudah diletakkan dengan baik sesuai jarak yang ditentukan maka siap dilakukan penembakan.

Setelah penembakan dilakukan, pemeriksaan fisik pada balistik panel guna mengetahui apakah dapat menahan laju peluru atau tidak.



Gambar 2.12 : Ilustrasi gaya yang diteruskan oleh peluru ke benda uji  
([https://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2019/11/TEIJ\\_Handbook\\_Ballistics\\_2019\\_DE F.pdf](https://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2019/11/TEIJ_Handbook_Ballistics_2019_DEF.pdf), n.d.)

Wadley Research Grup menjelaskan kerusakan akan dampak dari tumbukan proyektil struktur kerusakan material komposit kombinasi keramik dan metal menghasilkan pengembangan pulsa tekanan di bagian belakang sampel (*Wadley Research Group - UVA, n.d.*). Hal ini menyebabkan permukaan belakang mengalami tekanan di wilayah yang dipengaruhi oleh proyektil yang terfragmentasi. Permukaan belakang terdorong dan kemudian menjadi tegang hingga retak. Berikut Gambar 2.13 memperlihatkan kerusakan akibat gaya impact.



Gambar 2.13 : Ilustrasi terjadinya retakan oleh peluru ke benda uji (*Wadley Research Group - UVA, n.d.*)

## 2.4 Metode Elemen Hingga

Menurut Sharma (2018) , Metode elemen hingga adalah metode numerik yang memecah sistem kontinu menjadi sistem diskrit yang disebut elemen. MEH adalah metode yang kuat untuk memecahkan masalah rekayasa yang menantang karena memungkinkan penerapan kondisi batas untuk membuat model yang akurat yang memungkinkan studi dampak tabrakan. MEH digunakan untuk mensimulasikan tabrakan kendaraan karena kerangka waktu peristiwa tersebut sangat

kecil. Ini melibatkan perilaku nonlinier dan deformasi yang terjadi secara umum dalam skenario tabrakan.

Katili (2008) menyebutkan bahwa struktur diskrit terbentuk dari gabungan elemen yang perilakunya diharapkan mewakili perilaku struktur kontinu. Perilaku tiap elemen digambarkan dengan fungsi pendekatan yang mewakili peralihan dan tegangan yang akhirnya dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan matrik.

Dikritisasi (discretization) merupakan proses pemodelan dari suatu objek dengan membagi kedalam elemen-elemen kecil (finite elemen) yang dihubungkan oleh titik-titik (nodes) yang digunakan oleh elemen-elemen tersebut dan juga sebagai batasan dari objek tersebut. Didalam metode elemen hingga persamaan yang diperoleh dari seluruh sistem kemudian dibentuk dari penggabungan persamaan elemen-elemennya. Misalnya, untuk masalah struktur penyelesaian yang diperoleh digunakan untuk mencari besarnya deformasi (displacement) pada tiap titik (nodes) pada suatu objek, kemudian digunakan untuk memperoleh nilai besar tegangan (stress) dan regangan (strain).

Disis lain, (Ginar. E. Sukumar) mengembangkan *extended finite element method* dalam simulasi komputasi dengan software abaqus. Dibandingkan dengan metode elemen hingga klasik, X-FEM memberikan manfaat yang signifikan dalam pemodelan numerik dari perambatan retak. Dalam formulasi tradisional FEM, keberadaan retakan dimodelkan dengan mengharuskan retakan mengikuti tepi

elemen. Sebaliknya, geometri retak pada X-FEM tidak perlu disejajarkan dengan tepi elemen, yang memberikan fleksibilitas dan keserbagunaan dalam pemodelan. Metode ini didasarkan pada pengayaan model FE dengan tambahan derajat kebebasan (DOFs) yang diikat ke node elemen yang berpotongan dengan retak. Dengan cara ini, diskontinuitas dimasukkan dalam model numerik tanpa memodifikasi diskritisasi, karena mesh dihasilkan tanpa memperhitungkan adanya retakan. Oleh karena itu, hanya diperlukan satu mata jaring untuk setiap panjang dan orientasi retakan. Selain itu, node di sekitar ujung retak diperkaya dengan DOF yang terkait dengan fungsi yang mereproduksi bidang LEFM asimtotik.

#### **2.4.1 Software Abaqus**

Software ABAQUS adalah paket program simulasi rekayasa yang kuat, didasarkan pada metode elemen hingga, yang dapat memecahkan masalah mulai dari analisis linier relative sederhana sampai simulasi nonlinier yang paling menantang. Program ABAQUS berisi perpustakaan yang luas dari unsur-unsur yang dapat memodelkan hampir semua geometri apapun. Program ini memiliki daftar yang sangat luas dari model material yang dapat mensimulasikan perilaku sebagian besar bahan rekayasa, termasuk logam, karet, polimer, komposit, beton bertulang, busa yang lentur dan kuat, dan bahan geoteknik seperti tanah dan batuan.

Abaqus menawarkan berbagai kemampuan untuk simulasi aplikasi linier dan nonlinier. Permasalahan dengan beberapa komponen dimodelkan dengan mengaitkan geometri masing-masing komponen dengan model bahan yang sesuai dan menentukan interaksi komponen.

Pada aplikasi abaqus, kita juga dapat menentukan model pembebanan yang akan disesuaikan dengan pemodelan dunia nyata. Misal pada penelitian ini, pemodelan beban dipilih beban dinamik yaitu velocity. Ketika suatu benda bermassa bergerak dengan kecepatan tertentu maka akan menghasilkan energi kinetik. Kondisi seperti ini dapat kita sesuaikan pada aplikasi abaqus. Pada gambar 2.14 merupakan contoh hasil simulasi komputasi pada abaqus dengan pemodelan beban dampak dinamik.

Step	Increment	Total Time	CPU Time	Step Time	Stable Time Inc	Kinetic Energy	Total Energy
1	20618	0.000475016	1970.5	0.000475016	2.22581e-08	154.901	562.294
1	20842	0.000480009	1992	0.000480009	2.22771e-08	154.994	562.294
1	21067	0.000485014	2013.4	0.000485014	2.22081e-08	155.025	562.294
1	21292	0.000490006	2035.4	0.000490006	2.21614e-08	155.033	562.294
1	21517	0.000495005	2057	0.000495005	2.22924e-08	154.926	562.294
1	21742	0.0005	2078.4	0.0005	2.22109e-08	154.821	562.294

Log Errors Warnings Output Data File Message File Status File

Submitted: Thu Oct 28 14:25:39 2021

Started: Analysis Input File Processor

Completed: Analysis Input File Processor

Search Text

Text to find:   Match case

Gambar 2.14 Hasil simulasi komputasi pada aplikasi abaqus

Total time pada gambar tersebut merupakan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan semua komputasi pada pemodelan abaqus. Total energy merupakan energi kinetic yang dihasilkan benda bermassa yang memiliki kecepatan tertentu sedangkan energi kinetic sendiri merupakan sisa energi benda bermassa setelah bertumbukkan dengan benda yang lainnya. Dalam eksperimental, benda yang memiliki energi kinetic (energi impak kecepatan tinggi) energi akan berpindah ke benda yang lainnya ketika terjadi tumbukkan atau tabrakan. Jumlah energi yang berpindah ke benda yang lain ditentukan oleh daya serap energi benda tersebut. Pada umumnya besar energi kinetic suatu benda dapat kita ketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$E = \frac{1}{2} mv^2$$

Dimana : E = Energi kinetic (J)

$m$  = Massa (Kg)

$v$  = Kecepatan (m/s)

Dengan menggunakan persamaan tersebut, kita juga bisa menentukan daya serap energi suatu benda. Pada kejadian sebenarnya, energi kinetic secara terus menerus akan mengalami penurunan energi terhadap waktu. Selain itu, penurunan energi kinetic juga bisa disebabkan oleh karna adanya tumbukan benda lain. Dari persamaan energi kinetic akan menjadi seperti berikut

$$Ek = Ek_r + Ek_a$$

Dimana :  $Ek$  = energi kinetik

$Ek_r$  = energi kinetik sisa

$Ek_a$  = energi kinetik yang diserap/berpindah

Dengan menurunkan persamaan tersebut kita bisa menentukan persamaan kemampuan penyerapan suatu benda.

Persamaan diatas dapat kita tulis sebagai berikut :

$$Ek_a = Ek - Ek_r$$

$$Ek_a = \left(\frac{1}{2} mv^2\right) - \left(\frac{1}{2} mv_r^2\right)$$

$$Ek_a = \frac{1}{2} m (v^2 - v_r^2)$$