TUGAS AKHIR – TM 184835

STUDI NUMERIK APLIKASI KOMPOSIT RAMI SEBAGAI MATERIAL TAHAN BALISTIK TIPE IV

RAYHAN FIKRIANDRY RIZAL
NRP 02111340000184

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Sutikno S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

TUGAS AKHIR – TM 184835

STUDI NUMERIK APLIKASI KOMPOSIT RAMI SEBAGAI MATERIAL TAHAN BALISTIK TIPE IV

RAYHAN FIKRIANDRY RIZAL
NRP 02111340000184

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Sutikno S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

FINAL PROJECT – TM 184835

NUMERICAL STUDY OF RAMIE COMPOSITE APPLICATION AS TYPE IV BALLISTIC RESISTANT MATERIAL

RAYHAN FIKRIANDRY RIZAL
NRP 02111340000184

Supervisor
Dr. Eng. Sutikno S.T., M.T.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDI NUMERIK APLIKASI KOMPOSIT RAMI SEBAGAI MATERIAL TAHAN BALISTIK TIPE IV

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperileh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh:

RAYHAN FIKRIANDRY RIZAL
NRP. 02111340000184

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. **Dr, Eng, Sutikno, S.T., M.T.** (Pembimbing)
   NIP. 197407032000031001 .....
2. **Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA** (Penguji I)
   NIP. 196308151989032001 .....
3. **Fahmi Mubarok, S.T., M.Sc., PhD.** (Penguji II)
   NIP. 197801152003121002 .....
4. **Suwarno, S.T., M.Sc., PhD.** (Penguji III)
   NIP. 198005202005011003 .....

SURABAYA
AGUSTUS, 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDI NUMERIK APLIKASI KOMPOSIT RAMI SEBAGAI MATERIAL TAHAN BALISTIK TIPE IV

Nama Mahasiswa : Rayhan Fikriandry Rizal
NRP : 02111340000184
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembibing : Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.

Abstrak

Konflik yang terjadi di dunia dapat berujung pada perseteruan bersenjata yang dapat menimbulkan korban luka dan korban jiwa. Pada saat ini, persenjataan yang paling umum digunakan adalah senjata api. Oleh sebab itu, dibutuhkanlah suatu perangkat pelindung yang sesuai, dalam upaya mencegah timbulnya terlalu banyak korban akibat penggunaan senjata api pada medan konflik. NIJ 0101.06 tipe IV adalah standar tertinggi yang dapat dijadikan acuan dalam pembuatan perangkat pelindung terhadap proyektil senjata api.

Komposit adalah material yang umum digunakan sebagai bahan dasar pembuatan material tahan balistik. Pilihan pengaturan konfigurasinya yang nyaris tidak terbatas telah membuat komposit sebagai bahan dasar utama dalam pembuatan perangkat pelindung tahan balistik modern. Bermacam variasi serat aramid yang direkatkan polimer tertentu terbukti efektif dalam menahan laju serta menyerap energi kinetik proyektil senjata api. Sayangnya, selain biaya produksinya yang relatif tinggi, serat aramid yang terklasifikasi sebagai serat sintetis pun adalah salah satu sumber pencemaran lingkungan.

Serat rami yang diketahui sebagai serat alami dengan potensi tinggi untuk menyaingi kualitas serat aramid dapat dijadikan sebagai penguat alternatif. Studi ini bertujuan untuk memanfaatkan pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak finite element, untuk mensimulasikan aplikasi struktur komposit laminasi yang terbuat dari sejumlah lapisan komposit berbahan dasar epoksi-serat rami woven dengan ketebalan lamina tertentu sebagai material tahan balistik tipe IV sesuai standar NIJ 0101.06,

dalam upaya mengetahui ketebalan optimal dari konfigurasi komposit yang dimaksud.

Adapun hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah variasi pelat dengan jumlah lapisan sebanyak 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, dan 20 telah berhasil memenuhi standar penetrasi dan backface signature NIJ 0101.06 tipe IV. Diketahui bahwa penambahan jumlah lapisan membuat pelat secara keseluruhan membutuhkan energi lebih besar untuk terdeformasi. Namun, ini tidak memberikan pembenaran yang cukup untuk terus menambahkan jumlah lapisan. Karena kinerja tiap variasi pelat, yang diukur menggunakan kerja spesifik pelat, diketahui juga menurun seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan. Adapun kerja spesifik pelat adalah sebesar 438,011 Joule/kg untuk pelat 12 lapis, 389,069 Joule/kg untuk pelat 13 lapis, 359,558 untuk pelat 14 lapis, 335,04 untuk pelat 15 lapis, 311,565 untuk pelat 16 lapis, 315,851 untuk pelat 17 lapis, 290,499 untuk pelat 18 lapis, 279,804 untuk pelat 19 lapis, dan 266,512 untuk pelat 20 lapis. Pelat dengan konfigurasi paling optimal adalah pelat 13 lapis, disebabkan seluruh lapisan pada pelat termanfaatkan dengan baik untuk menyerap atau mengalihkan energi, pelat tidak dalam bahaya kegagalan, dan kerja spesifik pelat memiliki nilai yang relatif tinggi dibandingkan variasi pelat lainnya.

Kata kunci : balistik tipe IV; serat rami; epoksi; finite element; simulasi;

NUMERICAL STUDY OF RAMIE COMPOSITE APPLICATION AS TYPE IV BALLISTIC RESISTANT MATERIAL

Name : **Rayhan Fikriandry Rizal**
NRP : **02111340000184**
Department : **Mechanical Engineering**
Supervisor : **Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.**

Abstract

Conflicts in the world may become armed aggression which can end in injuries and deaths. Currently, the most common type of arms that is being used are firearms. Therefore, in an effort to prevent the emergence of too many casualties because of firearms, an appropriate protective equipment is needed. NIJ 0101.06 type IV is the highest standard that can be used as a reference to develop protective equipment against firearms projectile.

Composite is a material that is commonly used as a base for making ballistic resistant material. Its nearly limitless choice of configurable settings has made composite a key material to develop modern ballistic resistant protective equipment. Various variations of aramid fibers bonded together by certain polymers have proven to be effective on stopping firearms projectiles and absorbing its kinetic energy. Unfortunately, apart from the relatively high production costs, aramid fibers which are classified as synthetic fibers are also a source of environmental pollution.

Ramie fibers are known as natural fibers that have the potential to compete with aramid fiber as a reinforcement for composite material. This study aims to utilize numerical modeling using finite element software, to simulate the application of laminated composite structure from a number of epoxy-woven ramie fibers layer with a certain thickness as a type IV ballistic resistant material, according to NIJ 0101.06 standards, in an effort

to find the optimal amount of layers of the intended composite configuration.

The results obtained from this study is plate variations with 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, and 20 number of layers have succeeded to meet the penetration and backface signature standard of NIJ 0101.06 type IV. It is also known that increasing the number of layers makes the plate require more energy to be deformed. However this does not provide sufficient justification of continuing to increase the number of layers. Because each plate's variation performance, which is measured by calculating the plate's specific work, is also known to decreases along with the increase of number of layers. The specific work for each plate variation is 438,011 Joules/kg for 12 layers, 389,069 Joules/kg for 13 layers, 359,558 Joules/kg for 14 layers, 335.04 Joules/kg for 15 layers, 311,565 Joule/kg for 16 layers, 315,851 Joules/kg for 17 layers, 290,499 Joules/kg for 18 layers, 279,804 Joules/kg for 19 layers, and 266,512 Joules/kg for 20 layers. The plate with the most optimal configuration is the 13-layer plate, because all layers on the plate are properly utilized to absorb or dissipate energy, the plate is not in imminent danger of failure, and the plate's specific work has a relatively high value compared to other plate variations.

Keywords : ballistic resistant type IV; ramie fiber; epoxy; finite element; simulation;

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir penulis. Keberhasilan Tugas Akhir ini melibatkan banyak pihak yang telah berkontribusi didalamnya. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada :

1. **Anne Triany Sadikin, Nadia Rizanedewi Rizal**, dan **Rika Ermita Sadikin** selaku Ibu, Kakak, dan Bibi penulis yang selalu memberikan motivasi, dukungan, dan do'a untuk penulis hingga Tugas Akhir ini selesai.
2. Ibu **Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA** selaku dosen wali yang selalu memberikan banyak bimbingan, perhatian, dan mengarahkan penulis untuk fokus melangkah kedepan walaupun perlahan dan tidak menyerah dalam menyelesaikan perkuliahan selama tujuh tahun terakhir.
3. Bapak **Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.** selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan, semangat, serta petuah selama proses pengerjaan, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
4. Ibu **Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA,** Bapak **Fahmi Mubarok, S.T., M.Sc., PhD.,** dan Bapak **Suwarno, ST., MSc., PhD.** selaku dosen penguji Seminar Proposal dan Sidang Tugas Akhir yang telah memberikan banyak masukan dan koreksi sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
5. Seluruh karyawan Laboratorium Metalurgi dan Teknik Cor **Pak Mantri, Pak Gatot, Pak Budi, Mas Agus,** dan **Mas Ahyat** yang telah banyak membantu penulis dalam berkontribusi kepada Laboratorium Metalurgi.
6. **Rakyat Republik Metalurgi Raya Teknik Mesin ITS** (Zikhrul, Amanda, Faizal, Vidi, Aldo, Ijal, Ijaz, Zhul, Ghusteng, Yosua, dst) yang telah memberikan banyak inspirasi selama pengerjaan Tugas Akhir penulis.

7. **Departemen PSDM HMM 2015/2016** (Bintang, Afif, Shofi, dan Kimin) yang telah memberikan pengalaman kepada penulis untuk terus berusaha memenuhi tanggung jawab terlepas keadaan yang sangat tidak mendukung.
8. Tim **SC POROS 2016** yang telah meyediakan gerbang awal kepada penulis untuk menyadari bahwa kebermanfaatan kepada sesama manusia adalah suatu tanggung jawab, dan juga untuk mengaplikasikannya dengan penuh kebijaksanaan.
9. Sekumpulan manusia-manusia super a.n **Hanif, Adib, Raka, Bob, Furqon,** dan **Eja** yang secara tidak langsung selalu mengingatkan penulis untuk terus mengajarkan, mencontohkan, dan memperjuangkan sesuatu yang terbaik kepada manusia dan dunia.
10. Seluruh **SMRM** yang telah memberikan banyak momen pembelajaran kepada penulis.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan, terlepas sekecil apapun sejak penulis masih seorang mahasiswa baru sampai dengan diselesaikannya Tugas Akhir ini.

Semoga segala kebaikan yang diberikan mendapat balasan dari Allah SWT. Penulis menyadari bahwa laporan ini jauh dari sempurna oleh karena itu kritik dan saran sangat dibutuhkan. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 20 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak i
Abstract iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL xi
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 4
1.3. Tujuan 4
1.4. Manfaat 5
1.5. Batasan Masalah 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1. Literatur Sebelumnya 7
2.2. Dasar Teori 10
2.2.1. Hard armor 10
2.2.2. *Assault rifle* 10
2.2.3. Peluru 11
2.2.4. Komposit 12
2.2.5. Epoxy 16
2.2.6. Serat Rami 17
2.2.8. NIJ 0101.06 17
2.2.9. Sifat Mekanik Material 18
2.2.10. *Elastic Strain Recovery* 22
2.2.11. *Finite Element* 22
BAB III METODOLOGI 29
3.1 Diagram Alir Penilitian 29
3.3. Material dan Bahan 30
3.4 Model Uji Panel Komposit Tahan Balistik Tipe IV 31
3.5. Simulasi 32
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN 35
4.1. Data Hasil Simulasi 35
4.2. Penetrasi dan BFS pada Pelat 36

4.3. Transformasi Energi 51
4.3.1. Energi Peluru 52
4.3.2. Energi pada Pelat 55
4.4. *Energy Loss* 61
4.5. Energi Terusan 64
4.6. Kinerja Pelat 66
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 71
5.1. Kesimpulan 71
5.2. Saran 72
DAFTAR PUSTAKA 73
BIODATA PENULIS 75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Hard Armor (armslist.com, 3 Mei 2020) 10
Gambar 2. 2. Assaut Rifle Colt M4 (thefirearmsguide.com, 3 Mei 2020) 11
Gambar 2. 3. Peluru 7,62x51 mm AP 12
Gambar 2. 4. Matriks dan Penguat (ASM Metals Handbook Vol. 21, 2001) 13
Gambar 2. 5. Komposit Lamina (Gibson, 1994) 16
Gambar 2. 6. Finite elements pada bejana bertekanan 24
Gambar 2. 7. Pemberian Beban pada Plat (kiri); Model Elemen Hingga (kanan) 25
Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian 1 29
Gambar 3. 2. Diagram Alir Penelitian 2 30
Gambar 3. 3. Model Proyektil (a) dan Geometri Spesimen (b) ... 31
Gambar 3. 4. Model Lamina (c) dan Model Laminat 10 lapis (d) 32
Gambar 3. 5. Meshing Pada Model Proyektil dan Pelat Laminat 32
Gambar 3. 6. *Boundary Condition* Pemodelan 33
Gambar 4. 1. Potongan Model ketika Terpenetrasi 1 36
Gambar 4. 2. Potongan Model ketika Terpenetrasi 2 37
Gambar 4. 3. Area dan nilai BFS pada Pelat 12 Lapis 38
Gambar 4. 4. Tegangan pada Lapisan Terakhir Pelat 12 Lapis ... 38
Gambar 4. 5. Area dan Nilai BFS pada Pelat 13 Lapis 40
Gambar 4. 6. Tegangan pada Lapisan Terakhir Pelat 13 Lapis ... 41
Gambar 4. 7. Area dan Nilai BFS pada Pelat 14 Lapis 42
Gambar 4. 8. Tegangan pada Lapisan Terakhir Pelat 14 Lapis ... 43
Gambar 4. 9. Potongan Model ketika Terpenetrasi 3 44
Gambar 4. 10. Area dan Nilai BFS pada Pelat (A) 15 Lapis, (B) 16 Lapis, (C) 17 Lapis 45
Gambar 4. 11. Tegangan Lapisan Terakhir pada Pelat (A) 15 Lapis, (B) 16 Lapis. (C) 17 Lapis 46
Gambar 4. 12. Perbedaan Kontur Tegangan Lapisan Terakhir Pelat (A) 12 Lapis, (B) 15 Lapis, (C) 17 Lapis 47
Gambar 4. 13. Potongan Model ketika Terpenetrasi 4 48

Gambar 4. 14. Area dan Nilai BFS pada Pelat (A) 18 Lapis, (B) 19 Lapis, (C) 20 Lapis.....48
Gambar 4. 15. Tegangan Lapisan Terakhir pada Pelat (A) 18 Lapis, (B) 19 Lapis, (C) 20 Lapis.....50
Gambar 4. 16. Energi-Energi Pada Pelat 15 Lapis.....51
Gambar 4. 17. Grafik Energi Kinetik Peluru vs Waktu 53
Gambar 4. 18. Grafik Waktu Penetrasi Maksimum Peluru.....54
Gambar 4. 19. Grafik Kedalaman Penetrasi Peluru 54
Gambar 4. 20. Grafik Energi Kinetik Pelat.....57
Gambar 4. 21. Grafik Energi Internal Pelat.....58
Gambar 4. 22. Grafik Deformasi Total Pelat 58
Gambar 4. 23. Grafik Energi/Deformasi.....59
Gambar 4. 24. Grafik Energi Total Pelat vs Waktu 60
Gambar 4. 25. Grafik Energy Loss akibat Kerusakan Lapisan ...62
Gambar 4. 26. Grafik Energi Terusan 64
Gambar 4. 27. Kerja Spesifik Pelat 67

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Kriteria Standar Pengujian NIJ 0101.06.....18
Tabel 3. 1. Sifat Mekanik Komposit Epoksi-Serat Rami Woven, Konsorsium Penelitian Komposit Rami 31
Tabel 4. 1. Hasil Simulasi 35
Tabel 4. 2. Penetrasi pada Pelat.....62
Tabel 4. 3. Energi yang Diteruskan Pelat.....64
Tabel 4. 4. Massa setiap Variasi Pelat.....66

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dunia tidak pernah lepas dari konflik antar sesama manusia. Konflik yang terjadi dapat berujung pada perseteruan fisik yang kemudian dapat menimbulkan korban luka. Tergantung dari keparahan luka tersebut, tidak jarang luka yang dihasilkan akan membuat korban kehilangan jiwanya. Seiring dengan berkembanganya persenjataan yang digunakan oleh manusia, luka-luka yang ditimbulkan akibat konflik pun berkembang dari mulai luka memar akibat senjata tumpul, luka sayat dan tusuk akibat senjata tajam, dan akhirnya menjadi luka tembak akibat senjata api. Kofi Annan pernah menyatakan dalam pidatonya didepan Majelis Umum PBB bahwa jumlah korban jiwa akibat senjata api sungguh mengerdilkan sistem persenjataan lainnya. Sehingga dalam konteks kerusakan yang dihasilkan, senjata api dapat dideskripsikan sebagai senjata pemusnah masal [12]. *American Medical Association* pun menyatakan pada studinya bahwa meskipun sejak tahun 1990 terdapat penurunan tingkat kematian secara keseluruhan akibat senjata api, pada tahun 2016 saja, diestimasikan terdapat 195 ribu sampai 276 ribu kematian dengan penyebab yang sama [13]. Modern ini, satuan militer dan kepolisian negara-negara di dunia telah memanfaatkan material tahan balistik untuk diaplikasikan sebagai *body armor* dan *vehicle armor* sebagai bentuk pertahanan pertama dari peluru dan pecahannya, dalam upaya meminimalkan jumlah korban akibat konflik bersenjata.

Terdapat beberapa tipe material tahan balistik. Berdasarkan klasifikasi ancaman balistik yang dapat diterimanya, material tahan balistik terbagi menjadi tipe I, tipe II, tipe III, tipe IV, dan tipe khusus. Diurutkan mengikuti penomorannya, material tipe satu sampai dengan tipe empat dapat menahan energi balistik peluru yang terus meningkat, dimana tipe satu adalah material yang paling lemah. Material tahan balistik dapat memiliki konfigurasi

bahan dasar yang tidak tentu selama prototipe yang dihasilkan dapat memenuhi standar pengujian balistik yang ada. Adapun baja, keramik, dan komposit berpenguat adalah bahan-bahan dasar yang umum digunakan sebagai material tahan balistik.

Komposit merupakan bahan dasar yang terus dikembangkan secara lebih lanjut dalam aplikasinya sebagai material tahan balistik modern. Komposit merupakan suatu bahan yang terbuat atau terdiri dari dua atau lebih material yang memiliki sifat mekanik yang berbeda. Keleluasaan dalam pengaturan konfigurasi bahan dasar dan fungsinya yang cenderung sangat spesifik merupakan alasan utama terhadap pengembangan komposit yang berkelanjutan pada bidang ini. *American Composite Manufacturers Association* menyatakan bahwa komposit balistik memberikan peningkatan performa yang signifikan serta penurunan berat dibandingkan material balistik yang terbuat dari logam. Kemudian, apabila logam diganti suatu sistem non-logam layaknya komposit bermatriks polimer standar, kemungkinan terjadinya degradasi akibat korosi pada lingkungan ekstrim pun berkurang secara signifikan [14]. Salah satu tipe komposit balistik paling umum yang digunakan pada saat ini terbuat dari serat sintetis para-aramid seperti Kevlar dan Twaron. Sayangnya, *International Union for Conservation of Nature* menyatakan bahwa serat sintetis memberikan kontribusi terbanyak (35%) atas keberadaan sampah mikroplastik yang terdapat di lautan dunia [15].

Serat rami (*Bohemia Nivera*) merupakan salah satu serat alam yang dapat dimanfaatkan sebagai penguat material komposit. Suryaneta (2007), telah meneliti kinerja serat rami sebagai penguat pada panel komposit tahan peluru. Penelitian Suryaneta menghasilkan panel komposit epoksi-serat rami yang dapat menahan ancaman balistik tipe I [1]. Pada tahun 2009, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) menyatakan bahwa serat rami berpotensi tinggi untuk memiliki sifat mekanik yang hampir sebanding dengan serat Kevlar™ [2]. Kevlar™ adalah merek dagang dari salah satu tipe konfigurasi serat aramid yang umum

digunakan sebagai bahan dasar material tahan balistik di dunia. Mujiyono (2014), meyakini bahwa serat rami adalah serat alam berbasis selulosa yang paling kuat, sehingga cocok untuk dijadikan sebagai material alternatif dalam pembuatan panel komposit tahan peluru. Penelitian Mujiyono menghasilkan panel komposit hibrida epoksi-rami-*hard facing material* yang dapat menahan ancaman balistik tipe IV [3]. Fabio de Oliveira Braga dkk (2017) meneliti perbandingan harga dan performa antara komposit berpenguat serat rami dengan komposit berpenguat serat Kevlar^{TM}. Fabio menyimpulkan bahwa komposit berpenguat serat rami menghasilkan karakteristik balistik yang serupa dengan komposit berpenguat serat Kevlar^{TM}, namun dengan reduksi harga yang signifikan [4].

Studi eksperimental mengenai respons balistik suatu material komposit telah banyak dilakukan. Namun, desain, performa, dan evaluasi panel komposit yang menjalani uji impak balistik membutuhkan pemahaman awal mengenai karakteristik material dibawah kondisi impak berkecepatan tinggi. Oleh karena itu, pemodelan numerik pun layak dilaksanakan untuk melakukan analisis awal dan juga untuk mendapatkan hasil pembanding yang dijalankan dalam keadaan ideal. Pada tahun dalm rentang tahun 2000-2010, terdapat model-model numerik yang mendeskripsikan beban impak pada anyaman komposit. Hanya saja, kebanyakan model tersebut berurusan dengan impak berkecepatan rendah layaknya pengujian *drop weight* untuk mensimulasikan jatuhnya alat uji [5]. Keadaan tersebut memiliki mekanisme kegagalan sangat berbeda dengan kegagalan akibat impak balistik. Sangat sedikit model numerik yang mensimulasikan impak proyektil berkecepatan tinggi yang dengan basis model komposit yang detil dan juga memiliki respon serta mekanisme kegagalan yang diasosiasikan terhadapnya [6]. Pada tahun 2018, Susetya A. J. melakukan penelitian yang membandingkan model numerik dengan studi eksperimen. Hasil simulasi model numerik Susetya berupa panel komposit *epoxy-HGM-woven ramie fiber* dengan ketebalan sebesar 45 cm yang dapat menahan ancaman balistik tipe

IV. Sayangnya, studi eksperimen menggunakan spesimen yang berdimensi identik dengan model numerik yang digunakan tidaklah lolos uji balistik. Setelah melakukan analisis kegagalan, Susetya menyimpulkan bahwa banyaknya *void* dan tidak meratanya persebaran HGM pada spesimen yang disebabkan proses manufaktur spesimen yang kurang baik adalah penyebab terdapatnya ketidaksinambungan antara hasil numerik dengan eksperimen [7].

Dalam penelitian ini, sebuah model numerik pelat tipis komposit bermatriks epoksi dan berpenguat serat rami *woven* dengan ketebalan tertentu dibuat berdasarkan ketentuan dimensi spesimen uji balistik dari *National Institute of Justice* (NIJ). Pemodelan spesimen uji menggunakan data sifat mekanik yang didapatkan dari data konsorsium penelitian komposit rami. Model kemudian dikonfigurasikan untuk memiliki jumlah lapisan yang terus meningkat sampai didapatkannya ketebalan minimum yang dapat memenuhi standar balistik NIJ 0106.01 tipe IV. Hal ini diharapkan dapat mensimulasikan *hard armor* yang terbuat dari komposit berstruktur *laminate* dengan karakteristik respon yang baru dalam menerima ancaman balistik tipe IV.

1.2. Rumusan Masalah

Berapa jumlah lapisan yang harus dimiliki komposit lamina epoksi-rami *woven* untuk dapat melaksanakan fungsinya sebagai material tahan balistik tipe IV sesuai standar NIJ 0101.06 secara optimal

1.3. Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui jumlah lapisan optimal dari tumpukan komposit lamina bermatriks epoksi dan berpenguat serat rami *woven* dalam aplikasinya sebagai material tahan balistik tipe IV dengan menggunakan standar NIJ 0101.06 dan analisis penyerapan energi balistik pada pelat sebagai dasaran.

1.4. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar literatur penelitian berbasis studi eksperimen dengan spesimen bermaterial dengan konfigurasi serupa bagi pihak-pihak terkait dan dapat dijadikan salah satu altenatif pengambilan kebijakan instansi militer dalam hal pengadaan peralatan keamanan dan sistem persenjataan.

1.5. Batasan Masalah

Batasan yang diberikan pada penelitian ini agar hasil yang didapatkan sesuai degan harapan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian yang dilakukan berbasis studi numerik dan dilaksanakan dengan bantuan perangkat lunak *finite element*.
2. Geometri model dan simulasi pengujian mengikuti standar material tahan balistik tipe IV dari NIJ 0101.06
3. Lapisan-lapisan komposit lamina dianggap menempel sempurna antara satu sama lainnya

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Literatur Sebelumnya

Penggunaan serat rami sebagai penguat pada komposit telah diteliti dan dibuktikan sebagai serat alam yang dapat menahan penetrasi peluru. Suryaneta telah meneliti kemampuan tahan balistik anyaman serat rami dalam matriks epoksi pada tahun 2007. Penelitian Suryaneta menyimpulkan bahwa komposit epoxy-anyaman rami dapat menahan penetrasi proyektil .38 *Smith and Wesson Special*, yang termasuk kedalam ancaman balistik tipe I. Lembaga Ilmu Pengetahuian Indonesia kemudian memberikan pernyataan pada tahun 2009 bahwa serat rami adalah serat alam yang memiliki potensi tinggi untuk memiliki sifat mekanik yang sebanding dengan salah satu tipe serat aramid yang umum digunakan sebagai material tahan balistik, yaitu Kevlar™. Kemudahan untuk memperolehnya didalam negeri, biaya produksi serat yang rendah, proses produksinya yang mudah, sifatnya yang tidak menyebabkan iritasi pada kulit manusia dan ramah lingkungan merupakan argumen tambahan mengenai keunggulan aplikasi serat rami sebagai penguat komposit. Namun, serat alam seperti rami selalu memiliki keterbatasan fundamental, dimana kualitas serat selalu tergantung akan kualitas panen secara umum. Oleh karena itu, LIPI menyatakan bahwa dibutuhkannya rekayasa budi daya tanaman rami, pengontrolan proses panen, dan pengontrolan pengolahan serat untuk mendapatkan produk serat rami dengan kualitas yang lebih homogen dan berkualitas.

Soemardi TP dkk (2009) melakukan studi eksperimental untuk mengetahui potensi komposit lamina epoksi-rami dalam aplikasinya sebagai soket prostesis. Dengan metode *hand lay-up*, Soemardi membuat spesimen yang memiliki variasi fraksi volume serat sebesar 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50%, dimana pada setiap variasinya terdapat 6 buah sampel. Kemudian, seluruh sampel diuji tarik berdasarkan ASTM D 3039/D 3039M, dan diuji geser berdasarkan ASTM D 4225/D 4255M-83. Data hasil pengujian

kemudian disajikan dalam bentuk hubungan antara kekuatan tarik, kekuatan geser, modulus elastisitas, modulus geser, vs fraksi volume serat. Data tersebut kemudian dibandingkan dengan data hasil perhitungan teoretis dan kegagalan yang terjadi diobservasi menggunakan *Scanning Electron Microscope*. Hasil akhir penelitian kemudian dibandingkan dengan standar ISO mengenai bahan plastik/polimer yang diaplikasikan pada bidang kesehatan. Soemardi menyimpulkan bahwa komposit yang ditelitinya telah berhasil melewati standar sifat mekanik yang berkesesuain, dan komposit tersebut sangat berpeluang untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai bahan alternatif untuk membuat soket prostesis atas lutut [8]. Soemardi TP dkk melakukan penilitian lanjutan berkenaan aplikasi komposit untuk aplikasi yang sama di tahun 2011. Kali ini, Soemardi membandingkan kekuatan tarik dan kekuatan lentur komposit Ramie-Epoxy (RE), komposit Ramie-Polypropylene (RP), dan komposit Fiberglass-Polypropylene (FGP). Berbeda dengan penelitiannya yang terdahulu, Soemardi kini menggunakan metode *Filament Winding* untuk membuat spesimen tipe RE dan RP. Sedangkan, FGP dibuat mengunakan metode *hand lay-up*. Soemardi menyimpulkan bahwa komposit RE memiliki kekuatan tarik, modulus elastisitas, serta kekuatan lentur tertinggi dibandingkan dengan RP dan FBG. Ketersediaannya secara lokal, sifat biomekaniknya yang sesuai, serta bobotnya ringan, memperlihatkan bahwa komposit RE memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material alternatif terhadap FGP yang sudah umum diaplikasikan sebagai soket prostesis.

Pada tahun 2014, Mujiyono melakukan penelitian lebih lanjut mengenai kinerja serat rami dalam aplikasinya sebagai penguat pada panel komposit tahan balistik. Meneruskan penelitian dari tahun 2007 yang telah menghasilkan panel komposit epoksi-rami yang dapat menahan ancaman balistik tipe IIIA, penelitian Mujiyono berhasil menghasilkan panel komposit epoksi hibrida rami-*hardfacing material* (KEHR-HM) yang dapat menahan ancaman balistik tipe IV. Mujiyono menyatakan bahwa HM

berfungsi sebagai suatu lapisan keras yang dapat menumpulkan ketajaman proyektil balistik yang selalu mengoyak anyaman serat rami pada spesimen penelitian sebelumnya, akibat pengujian balistik tipe IV. Fabio de Oliveira Braga pun melakukan penelitian yang membandingkan sifat mekanik dan nilai ekonomis beberapa tipe komposit pada *Multilayered Armor System* (MAS). Komposit tersebut di *sandwich* oleh keramik berbahan dasar alumina-niobia (Al_2O_3-4%Nb_2O_5) pada bagian depan, dan *aluminium alloy* 5052 H34 pada bagian belakang. Tipe-tipe komposit tersebut terdiri dari panel komposit epoksi-serat rami, panel komposit epoksi-kain rami, panel komposit epoksi-kain Kevlar™, laminasi kain Kevlar™. Berdasarkan statistic hasil pengujian, Fabio menyimpulkan bahwa tiap tipe komposit memiliki karakteristik balistik yang sama, baik pada *backface signature* yang dihasilkan, mekanisme patahan mikroskopis, dan penangkapan pecahan proyektil. Hanya saja, panel komposit epoksi-serat rami menghasilkan reduksi biaya yang signifikan dibandingkan tipe komposit lainnya.

Susetya A. J, melakukan pemodelan numerik yang kemudian dilanjutkan studi eksperimen berkenaan komposit *epoxy-HGM-woven ramie* yang diaplikasikan sebagai *hard armor* untuk menahan proyektil kaliber .30 armor piercing (AP), sesuai standar NIJ 0101.06 tipe IV. Pemodelan numerik yang dilakukan susetya menghasilkan panel dengan ketebalan 45 mm dan massa 3,381 kg untuk mencapai tujuan yang diharapkan. Simulasi pengujian menghasilkan model dengan geometri tersebut telah terpenetrasi sedalam 37,33 mm dari permukaan depan, dan nilai *back face signature* (BFS) sebesar 2,44 mm. Kedua nilai tersebut memenuhi standar NIJ 0101.06 tipe IV yang membutuhkan kondisi spesimen yang tidak terpenetrasi secara penuh, dan juga nilai BFS maksimum sebesar 44 mm. Sayangnya, studi eksperimen yang dilakukan berdasarkan geometri hasil pemodelan numerik tidaklah menghasilkan panel yang lolos pengujian balistik yang berkesesuaian, disebabkan proyektil berhasil menembus panel yang dibuat.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Hard armor

Untuk kategori *armor* dibedakan menjadi dua jenis menurut fungsi kekuatannya yaitu ada *soft armor* dan *Hard armor*. Untuk *soft armor*, merupakan lapisan anti peluru yang biasanya digunakan untuk menahan peluru laras pendek seperti *Revolver*, *Magnum* dan Colt. *Soft Armor* sendiri biasanya terbuat dari *kevlar*, dikarenakan pada lapisan anti peluru ini diperlukan lapisan yang memiliki fleksibilitas tinggi. Sedangkan untuk *Hard Armor*, merupakan suatu lapisan anti peluru yang berbentuk panel. Pada umumnya, *Hard armor* yang ada di pasaran terbuat dari keramik dan plat baja. Penggunaan keramik dan plat baja sendiri dikarenakan diperlukannya untuk menahan peluru untuk senjata api laras panjang.

Gambar 2. 1. Hard Armor (armslist.com, 3 Mei 2020)

2.2.2. *Assault rifle*

Assault Rifle adalah terjemhan dari kata bahasa jerman yaitu *Sturmgwehr*, penamaan ini pertama kali disematkan oleh Adolf Hitler unruk menjelaskan kegunaan *Maschinenpistole* 43, yang kemudian di namakan kembali sebagai *Sturmgewehr 44*, yang

merupakan sebagai konsep senjata laras panjang yang mempengaruhi model semua senapan modern sekarang. *Assault Rifle* menjadi istilah untuk semua senjata api yang memiliki fungsi yang sama dengan *Stg* 44. Sebuah senjata api harus mengikuti karakteristik yang sama untuk dapat dibilang senjata tersebut *assault rifle* yaitu :

- Haruslah sebuah senapan individu yang ditembakan dengan menempelkan di bahu (memiliki popor bahu)
- Harus memiliki pilihan untuk menembak otomatis, semi otomatis atau *burst* 3 butir
- Harus memiliki kartrid dengan kekuatan menengah : lebih kuat dari kartrid pistol
- Amunisi harus di pasok dari *magazine* (kotak peluru) yang dapat dilepas

Gambar 2. 2. Assaut Rifle Colt M4 (thefirearmsguide.com, 3 Mei 2020)

2.2.3. Peluru

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, peluru adalah barang tajam (dari timah, besi, dan sebagainya) pengisi patrun (tabung tembaga yang berisikan mesiu) atau yang dilepaskan dengan senjata api. Sejarah perkembangan peluru dimula pada masa abad ke 14, dimana peluru berbentuk bulat yang dilepaskan dari meriam berguna untuk menghancurkan sistem pertahanan musuh. Pada tahun 1848, bentuk peluru berubah yang semula bulat

menjadi kerucut berlubang dengan tujuan meningkatkan akurasi ketika ditembakkan.

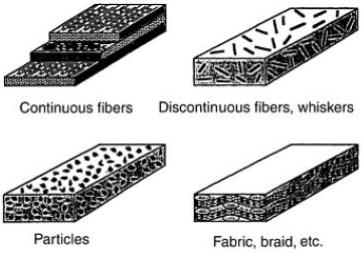
Perkembangan selanjutnya, bentuk peluru berubah menjadi model *armor piercing* dimana proyektil peluru dan bubuk mesiu disatukan dalam sebuah selongsong. Selongsong atau *core* tersebut memiliki ketajaman dan nilai kekerasan dari peluru model FMJ. Model peluru ini menjadi cikal bakal peluru yang ada sekarang. Perkembangan terkini model peluru menggunakan model AP (*armor piercing)* dimana proyektil mempunyai inti yang lebih lunak lalu dibungkus dengan logam yang keras sehingga peluru dapat melakukan penetrasi lebih dalam ketika mengenai target dan menimbulkan kerusakan yang lebih besar.

Gambar 2. 3. Peluru 7,62x51 mm AP

2.2.4. Komposit

Material komposit adalah kombinasi makroskopik dari dua atau lebih material, yang memiliki *interface* yang jelas diantara keduanya. Material komposit modern biasanya dioptimasukan untuk mencapai keseimbangan properti untuk aplikasi tertentu yang sangat spesifik. Definisi praktikal secara umum yang dapat menjelaskan material komposit adalah material yang memiliki

matriks kontinu sebagai suatu konstituen, dimana matriks tersebut mengikat dan membentuk serangkaian konstituen yang lebih kuat dan lebih kaku. Hasil kombinasi kedua konstituen atau lebih ini akan menghasilkan material komposit yang memiliki properti struktural lebih superior dibandingkan yang dimiliki masing-masing konstituennya. Secara umum, peningkatan properti struktural tersebut disebabkan terdapatnya mekanisme pembagian pembebanan kepada tiap konstituen yang terdapat pada material komposit. Mengikuti penjelasan yang sama, komposit pun dapat dioptimasikan sedemikian rupa untuk menghasilkan performa yang menarik pada properti fungsi yang berbeda selain efisiensi tinggi pada properti strukturalnya secara khusus. Komposit tipikalnya memiliki serat atau partikulat yang memiliki kekakuan dan kekuatan lebih tinggi dibandingkan fasa matriks kontinunya. Serat atau partikulat tersebut disebut sebagai penguat komposit. Namun, tidak jarang juga terdapat komposit yang penguatnya memiliki keuletan lebih tinggi dibandingkan matriksnya, sehingga komposit akhirnya memiliki ketangguhan yang lebih tinggi,



Gambar 2. 4. Matriks dan Penguat (ASM Metals Handbook Vol. 21, 2001)

Komposit umumnya diklasifikasikan menjadi dua tipe yang berbeda. Tipe yang pertama umumnya dibuat berdasarkan konstituen matriksnya. Pada tipe ini, terdapat *organic matrix composites* (OMCs), *metal matrix composites* (MMCs), dan *ceramic matrix composites* (CMCs). Istilah “komposit bermatriks organik” secara umum diasumsikan terdiri dari dua kelas komposit,

yaitu *polymer matrix composites* (PMCs) dan *carbon matrix composites* (dapat juga disebut sebagai *carbon-carbon composites*). Komposite bermatriks karbon tipikal dibuat dari PMCs dengan menambahkan langkah tambahan yaitu mengkarbonisasi dan merapatkan matriks polimer orisinilnya. Pada komunitas penelitian dan pengembangan, *internetallic-matrix composites* (IMCs) kadang disebut sebagai klasifikasi tersendiri yang berbeda dibandingkan MMCs. Namun, secara praktikal material tersebut tidaklah memiliki perbedaan radikal relatif terhadap properti MMCs. Pada setiap sistem tersebut, matriks komposit tipikalnya memiliki fasa yang kontinu diseluruh komponen material,

Klasifikasi yang kedua umumnya merujuk terhadap bentuk penguat pada komposit tersebut, yaitu penguat partikulat, penguat serat pendek *whiskers*, penguat serat panjang yang dikonfigurasikan secara laminat, dan komposit anyaman atau *woven*. Agar penguat ini dapat memberikan peningkatan yang berguna terhadap properti material, secara umum biasanya dibutuhkan fraksi volum yang cukup besar relatif terhadap keseluruhan kompositnya. Sebuah penguat dapat dinyatakan sebagai partikulat apabila dimensinya memiliki kesamaan secara kasar. Oleh karena itu, komposit berpenguat partikulat termasuk komposit-komposit yang dikuatkan oleh bulatan, batangan, serpihan, dan bentuk-bentuk lainnya yang memiliki sumbu-sumbu yang cukup simetris. Penguat *whisker* dengan rasio aspek diantara 20 sampai dengan 100 sering diklasifikasikan sebagai penguat partikulat pada MMCs. Kedua penguat tersebut dapat diklasifikasikan sebagai penguat diskontiku, sebab fasa penguatnya selalu diskontinu khususnya pada fraksi volum rendah yang biasa digunakan pada MMCs. Terdapat juga material, yang umumnya merupakan polimer, dimana partikulat cenderung memanjang dibandingkan memperkuat material. Sistem pada material-material tersebut disebut sebagai *filled system*, disebabkan penguat seakan-akan hanya “mengisi” material. Material ini secara umum tidaklah diklasifikasikan sebagai komposit partikulat.

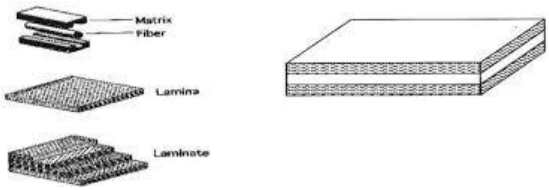
Walaupun begitu, pada kasus-kasus tertetu pengisi tersebut pun dapat memperkuat matriks material. Hal yang sama pun dalam dinyatakan terhadap partikulat yang ditambahkan kepada material untuk tujuan non-struktural, contohnya untuk meningkatkan ketahanan material terhadap api, untuk mengontrol penyusutan material, dan untuk meningkatkan konduktivitas termal dan listrik.

Komposit berpenguat serat kontinu memiliki penguat dengan panjang yang jauh lebih besar dibandingkan dimensi penampangnya. Sebuah komposit dapat ditentukan memiliki penguat serat diskontinu atau serat pendek apabila propertinya memiliki variasi terhadap panjang seratnya. Di lain sisi, ketika penambahan panjang serat tidaklah memberikan peningkatan pada modulus elastistisat atau kekuatan komposit, maka komposit dapat dinyatakan sebagai komposit berpenguat serat kontinu. Kebanyakan komposit berpenguat serat kontinu bahkan memiliki serat yang memiliki panjang hampir sama dengan keseluruh dimensi kompositnya. Kemudian, tiap lapisan komposit berserta kontinu tipikalnya memiliki orientasi serat secara spesifik, sehingga memberikan keseluruhan tumpukan laminasinya properti yang dapat disesuaikan secara fleksibel.

Kategori terakhir yang berhubungan dengan arsitektur serat adalah penguat serat yang dibentuk dengan dianyam untuk menghasilkan serat yang saling mengunci. Penguat tipe ini sering memiliki orientasi serat yang sedikit atau sepenuhnya terorientasi secara orthogonal terhadap bidang struktural primer komposit. Pendekatan ini digunakan disebabkan berbagai alasan, termasuk didalamnya adalah untuk memiliki kemampuan struktural, termal, dan kelistrikan secara tiga dimensi. Kemudian, selain klasifikasi yang telah dijelaskan, terdapat juga kemungkina untuk membuat konfigurasi serat yang mengkombinasikan dua atau lebih klasifikasi-klasifikasi tersebut. Contohnya, sebuah struktur laminasi yang memiliki lapisan komposit berpenguat serat anyaman dan lapisan komposit berpenguat serat kontinu. Mempertimbangkan keseluruhan klasifikasi dan konfigurasi yang

dapat diatur, fleksibilitas desain yang ditawarkan oleh material komposit sungguh sangat luas.

Lamina adalah gabungan dari dua atau lebih lapisan (satu lembar komposit dengan arah serat tertentu) yang membentuk elemen struktur secara integral pada komposit. Sebagai elemen sebuah struktur, lamina yang serat penguatnya searah saja, pada umumnya tidak menguntungkan karena meiliki sifat yang buruk.



Gambar 2. 5. Komposit Lamina (Gibson, 1994)

2.2.5. Epoxy

Epoxy adalah suatu kopolimer, terbentuk dari dua bahan kimia yang berbeda. Ini disebut sebagai "resin" dan "pengeras". Resin ini terdiri dari monomer atau polimer rantai pendek dengan kelompok epoksida di kedua ujung. Epoxy resin Paling umum yang dihasilkan dari reaksi antara epiklorohidrin dan bisphenol-A, meskipun yang terakhir mungkin akan digantikan dengan bahan kimia yang serupa. Pengeras terdiri dari monomer polyamine, misalnya Triethylenetetramine (Teta). Ketika senyawa ini dicampur bersama, kelompok amina bereaksi dengan kelompok epoksida untuk membentuk ikatan kovalen. Setiap kelompok NH dapat bereaksi dengan kelompok epoksida, sehingga polimer yang dihasilkan sangat silang, dan dengan demikian kaku dan kuat. Proses polimerisasi disebut "curing", dan dapat dikontrol melalui suhu, pilihan senyawa resin dan pengeras, dan rasio kata senyawanya; proses dapat mengambil menit untuk jam. Beberapa formulasi manfaat dari pemanasan selama masa penyembuhan, sedangkan yang lainnya hanya memerlukan waktu, dan suhu ambien.

2.2.6. Serat Rami

Serat rami merupakan salah satu serat tanaman kuat dan dapat diproduksi secara cepat dengan frekuensi panen tiga kali per tahun. Serat ini dapat diekstrak dengan cara mengambil serat kulit tanaman rami tersebut. Biasanya, panjang dan diameter ekstrak serat tersebut bervariasi berturut-turut antara 6 hingga 50 cm dan antara 20 hingga 35 mikrometer. Jika dibandingkan dengan serat alam lain, serat ini tergolong salah satu serat terkuat dengan komposisi selulosa (65-75%) dan lignin (1-2%) [11]. Sebagai perbandingan, kayu memiliki kandungan selulosa 40-50% dan kandungan lignin 15-35%. Bila serat rami ditarik atau dikupas dari batang tanamannya, akan didapatkan serat rami dalam bentuk gumpalan. Gumpalan tersebut dapat diproses lebih lanjut guna memisahkan masing-masing serat yang menempel bersamaan atau digunakan secara langsung untuk mencegah kerusakan serat.

2.2.8. NIJ 0101.06

NIJ 0101.06 merupakan standar yang diterbitkan oleh US Department of Justice. Dalam NIJ 0101.06 diatur kriteria dan tata cara pengujian yang dilakukan terhadap material tahan balistik secara umum.

Hard armor yang tidak tertembus peluru merupakan kriteria utama suatu *armor* dikatakan anti peluru, dengan melihat apakah peluru dapat menembus hingga permukaan bagian belakan komposit *hard armor*. Selain itu, ketika *hard armor* sudah tidak tertembus peluru perlu melihat lagi kriteria yang kedua yaitu *Back face Signature* kurang dari 44 mm. BFS merupakan suatu bekas atau dampak dari energi kinetik yang diberikan peluru ke *Hard armor*. Untuk mengetahui BFS dari suatu *hard armor*, saat pengujian perlu diberikan *backing material* pada bagian belakang *hard armor* berupa *clay* atau tanah liat sehingga dapat diukur deformasi akibat energi kinetik peluru atau *back face signature*

Tabel 2. 1. Kriteria Standar Pengujian NIJ 0101.06

Syarat kerja	Kriteria
• Jarak tembak minimal 15 meter dari model uji panel anti peluru • Tipe peluru 7,62 mm AP ditembakkan dengan Sejata api laras panjang (v ≈ 878 m/s)	• *Backface signature* yang terjadi pada *hard armor* ≤ 44 mm • *Hard armor* tidak tembus oleh peluru

2.2.9. Sifat Mekanik Material

Pada penelitian ini, terdapat beberapa sifat mekanik yang menjadi acuan pembahasan. Adapun sifat-sifat mekanik tersebut adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan

   Dalam ilmu bahan, terdapat banyak jenis kekuatan. Contoh diantaranya adalah compression strength, tensile strength, shear strength, flexural strength, fracture strength, dsb. Namun, istilah kekuatan paling umum diasosiasikan dengan tensile strength atau kekuatan tarik. Hal ini disebabkan nilai kekuatan tarik suatu material dapat merepresentasikan banyak sifat mekanik lainnya yang dimiliki material tersebut. Kekuatan adalah nilai tengangan maksimum yang dapat diterima oleh suatu material/struktur dalam keadaan tarik.

   Terdapat banyak hal yang memiliki keterikatan erat dengan istilah kekuatan tarik. Hal-hal ini dinamakan tensile properties. Diantaranya adalah yield strength, proportional limit, modulus elastisitas, modulus resilience, ultimate tensile strength, dan fracture strength. Yield strength adalah kekuatan material ketika mengalami fenomena yielding. Yielding adalah keadaan dimana material mulai mengalami deformasi plastis. Dengan begitu, yield stress adalah nilai tegangan dimana material mulai mengalami deformasi plastis. Pada grafik tegangan-regangan, yielding terletak pada suatu titik pada kurva dimana kurva tsb tidak lagi bergerak secara linear

atau proporsional antara nilai tegangan dengan regangannya. Titik ini disebut juga sebagai proportional limit. Dalam kasus yang sederhana, proportional limit dan yield point berada pada titik yang sama.

Namun, dalam banyak kasus, keberadaan titik proportional limit serta yield point ini pada grafik cenderung sulit ditentukan secara visual. Hal ini disebabkan setiap material uji tidaklah menghasilkan suatu grafik yang uniform jika dibandingan satu dengan lainnya. Oleh karena itu, berdasarkan hasil konvensi internasional, yield point dapat diketahui dengan mencari titik perpotongan antara garis parallel dengan offset 0.02 persen terhadap modulus elastisitas, dengan garis kurva tegangan-regangan. Titik perpotongan tersebut adalah titik yield point. Nilai tegangan pada yield point tersebut disebut sebagai yield stress, dan dapat juga dinamakan yield strength. Apabila menggunakan metode ini, terdapat kemungkinan proportional limit dan yield point tidaklah berada pada satu titik

Modulus elastisitas adalah suatu perumusan untuk mengetahui nilai kekakuan dan/atau elastisitas material. Modulus resilience adalah suatu perumusan untuk mengetahui seberapa besar energi deformasi elastis yang dapat diserap material. Ultimate tensile strength adalah nilai tegangan tarik maksimum yang dapat diterima oleh material. Nilai UTS ini terdapat pada puncak kurva tegangan-regangan. Fracture strength adalah nilai tegangan dimana material akhirnya mengalami kegagalan (patah)

2. Ketangguhan

Secara umum, adalah suatu nilai yang mengukur kemampuan suatu material untuk menyerap energy sampai akhirnya material tersebut patah. Nilai ketangguhan suatu material memiliki ketergantungan dengan sifat pembebanan yang diberikan, dan juga dengan kondisi serta geometri material tersebut. Contohnya, walau terbuat dari material yang serupa, nilai ketangguhan suatu spesimen yang memiliki

surface finish yang kasar akan berbeda dengan nilai ketangguhan spesimen yang memiliki surface finish yang halus. Untuk mendapatkan sifat tangguh, penting bagi suatu material untuk memiliki kekuatan DAN keuletan. Hal ini karena pada umumnya, material ulet memiliki ketangguhan yang lebih baik dibandingkan material getas, walau material getas kemungkinan memiliki yield strength dan juga tensile strength yang lebih tinggi

3. Keuletan dan Kegetasan

   Adalah suatu nilai yang mengukur seberapa banyak deformasi yang diterima oleh material ketika patah. Material memiliki sifat ulet apabila material tersebut mengalami banyak deformasi plastis ketika patah. Keuletan dan kegetasan dapat dinyatakan sebagai sifat yang berlawanan secara langsung. Maksudnya, material yang ulet pasti tidak getas, dan sebaliknya. Oleh karena itu, material getas adalah suatu material yang hanya sedikit atau bahkan sama sekali tidak mengalami deformasi plastis ketika patah.

4. Kekakuan, Elastisitas, *Resilience*, Plastisitas

   Apabila keuletas dan kegetasan berpaku kepada deformasi plastis, kekakuan dan elastisitas berpaku kepada deformasi elastis yang dialami material. Deformasi elastis adalah deformasi yang terjadi ketika tegangan dan regangan yang diterima oleh material bekerja secara proporsional (sebanding) terhadap satu dengan lainnya. Deformasi elastis serta sifat mekanik kekakuan dan elastisitas erat hubungannya dengan hooke’s law. Hooke’s law dinyatakan dengan E atau modulus elastisitas (modulus young). Modulus elastisitas berguna untuk mengetahui proporsionalitas yang dimaksud dengan cara membandingkan tegangan dengan regangan yang bekerja pada suatu material. Hanya saja, apabila suatu tegangan dan regangan yang bekerja terhadap suatu material memiliki proporsionalitas, maka kurva tegangan-regangan yang dihasilkan tentu akan berbentuk linear dengan besaran kemiringan tertentu. Nilai kemiringan dari kurva tersebut

adalah nilai dari modulus elastisitas. Artinya, hooke's law berlaku pada kondisi dimana sebuah material belum mengalami yielding.

Suatu material yang memiliki modulus elastisitas (E) yang tinggi, apabila rasio atau perbandingan tegangan terhadap regangan yang terjadi sebelum yielding bernilai tinggi pula. Dalam hal ini, kurva yang dihasilkan akan memiliki kemiringan yang tajam. Material yang memiliki modulus elastisitas yang tinggi kemudian dapat dinyatakan material yang kaku. Dan hal ini berlaku sebaliknya. Apabila modulus elastisitas suatu material bernilai rendah, maka kurva daerah proporsional akan memiliki kemiringan yang landau, dan material tersebut dapat dinyatakan sebagai material elastis. NIlai kekakuan dan elastisitas memiliki ketergantungan terhadap temperatur kerja material.

Penting untuk dimengerti bahwa sifat kaku dan elastis hanyalah sifat kualitatif yang berfungsi sebagai pembanding terhadap satu sama lain. Karena modulus elastisitas hanya dapat memberikan data mengenai nilai kemiringan saja, dan tidak dapat memberikan data mengenai seberapa panjang sebenarnya kurva tegangan-rengangan tersebut sampai akhirnya mencapai batas proporsionalnya. Panjang dari kurva proporsional inilah yang bersifat kuantitatif, sebab nilai panjang tersebut akan mendikte mengenai seberapa banyak energi deformasi elastis yang dapat diterima oleh material. Besarnya energy deformasi elastis yang dapat diserap suatu material dapat diketahui melalui modulus resilience, dan kemampuan suatu material untuk menyerap energi deformasi elastis kemudian dinamakan sebagai Resilience.

Suatu material yang tidak dapat menyerap banyak energi deformasi elastis adalah material yang mudah mengalami deformasi plastis, atau material dengan sifat plasitisitas yang baik. Sifat plastisitas material diindkasikan dengan kurva tegangan-regangan proporsional yang pendek,

dan modulus elastisitas yang rendah. Atau dengan kata lain, nilai modulus resilience yang kecil.

5. Kekerasan

Adalah suatu nilai yang mengukur ketahanan material terhadap deformasi plastis yang terlokalisasi. Contohnya penyok kecil, baret, indentasi, dsb. Nilai kekerasan bisa didapatkan dengan melakukan pengujian kekerasan.

2.2.10. *Elastic Strain Recovery*

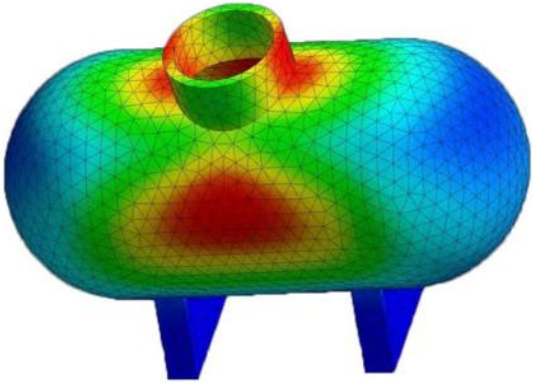
Elastic strain recovery adalah kemampuan suatu material yang telah dideformasi plastis, untuk sedikit kembali ke bentuk asalnya ketika pembebanan dihentikan/dilepaskan. Besarnya pengembalian bentuk ini tergantung dari kemampuan peregangan elastis dan juga besarnya deformasi elastis yang dapat diterima oleh material. Peregangan elastis tersebut dinilai menggunakan modulus elastisitas, sedangkan besarnya deformasi elastis dinilai menggunakan modulus resilience. Dalam kasus dimana pembebanan belum dilepaskan , maka sifat resilience material masih tetap bekerja untuk menyerap pembebanan deformasi elastis. Hal ini membuat total jenis deformasi yang diterima material menjadi deformasi elastis ditambah deformasi plastis. Ketika pembebanan dilepaskan, sesuai dengan sifat deformasinya yang elastis, maka sebagian kecil material akan mengalami plastic flow untuk mengembalikan spesimen ke bentuk awalnya. Proses tersebut dinamakan elastic recovery.

2.2.11. *Finite Element*

Finite Element adalah salah satu dari metode numerik yang memanfaatkan operasi matrix untuk menyelesaikan masalah-masalah fisik. Metode lainnya adalah metode analitik, untuk melakukannya diperlukan suatu persamaan matematik yang merupakan model dari perilaku fisik. Semakin rumit perilaku fisiknya (karena kerumitan bentuk geometri, banyaknya interaksi beban, constrain, sifat material, dan lain-lain) maka semakin sulit atau bahkan mustahil dibangun suatu model matematik yang bisa

mewakili permasalahan tersebut. Alternatif metodenya adalah dengan cara membagi kasus tadi menjadi bagian-bagian kecil yang sederhana yang mana pada bagian kecil tersebut kita bisa membangun model matematik dengan lebih sederhana. Kemudian interaksi antar bagian kecil tersebut ditentukan berdasarkan fenomena fisik yang akan diselesaikan. Metode ini dikenal sebagi metode elemen hingga, karena kita membagi permasalahan menjadi sejumlah elemen tertentu (finite) untuk mewakili permasalah yang sebenarnya jumlah elemennya adalah tidak berhingga (kontinum).

Finite element analysis (FEA) adalah suatu cara atau metode numerik untuk mendapatkan penyelesaian dari persamaan diferensial maupun persamaan integral. Penyelesaian persamaan diferensial didasarkan pada penyederhanaan persamaan diferensial yang kompleks dan banyak menjadi persamaan diferensial biasa, kemudian diselesaikan dengan mengintegralkan secara numeris dengan menggunakan metode Euler atau Runge-Kutta. Dalam FEA, obyek baik berupa luasan (2D) maupun volume (3D) dipecah menjadi elemen kecil-kecil kemudian dengan memasukan nilai batasan (biasanya pada permukaan) dan nilai awal (sebagai trial and error) pada rumus-rumus yang ada (misalnya persamaan diferensial). Perhitungan seperti itu dilakukan berulang-ulang (iterasi) sehingga diperoleh hasil yang tepat (masuk toleransi). Perhitungan ini bila dilakukan secara manual akan sulit dan memerlukan waktu yang lama, namun dengan bantuan sebuah computer, perhitungan menjadi mudah dan cepat. Dengan perkembangan computer yang pesat, maka bermunculan banyak software FEA untuk membantu merancang suatu komponen dan sistem.



Gambar 2. 6. Finite elements pada bejana bertekanan

Komponen mekanis dalam bentuk batang atau balok sederhana, dapat dianalisis dengan metode dasar mekanika. Namun kenyataanya sangat jarang komponen mekanis berbentuk sederhana, sehingga membutuhkan metode numerik yang lebih komplek. Oleh sebab itulah tercipta metode elemen hingga. Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala phisis. Metode elemen hingga membagi (discretizes) struktur menjadi kecil tetapi terbatas, yang didefinisikan dengan baik, substruktur elastis (elemen). Dengan menggunakan fungsi polinomial dan dengan operasi matriks, perilaku elastis setiap elemen terus menerus dikembangkan dalam hal material elemen dan sifat geometris. Beban dapat diterapkan dalam elemen (gravitasi,dinamis, termal, dll), pada permukaan elemen, atau di nodal elemen. Nodal elemen adalah yang mengatur dasar elemen, karena nodal di elemen menghubungkan elemen unsur lain, di mana sifat elastis dari elemen yang akhirnya perlihatkan, jika kondisi batas yang ditetapkan, dan akhirnya diterapkan. Sebuah nodal memiliki derajat kebebasan (DOF). Derajat kebebasan adalah gerak translasi dan rotasi independen yang ada di nodal. Sebagian besar, nodal dapat memiliki tiga gerak

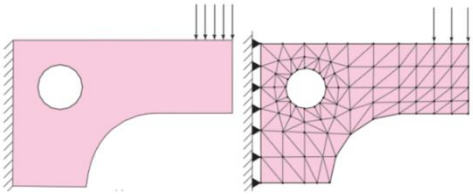
translasi dan tiga gerak rotasi dari derajat kebebasan. Setelah setiap elemen dalam struktur didefinisikan secara lokal dalam bentuk matriks, kemudian elemen di satukan secara global melalui nodal (DOF) mereka ke dalam sistem matriks secara keseluruhan. Kemudian penerapan beban dan kondisi batas ditentukan melalui operasi matriks, nilai dari semua perpindahan derajat kebebasan tidak diketahui sehingga harus ditentukan. Setelah hal itu dilakukan, hal ini menjadi masalah sederhana untuk menggunakan perpindahan dalam menentukan regangan dan tegangan didalam persamaan konstitutif melalui elastisitas. Metode elemen hingga adalah metode numerik domain diskritisasi dari struktur secara berkelanjutan sehingga kesalahan pun mungkin terjadi, yaitu:

1. Kesalahan komputasi

   Kesalahan ini adalah karena perhitungan komputer dan formulasi dari skema integrasi numerik yang digunakan. Untuk tujuan komersial kebanyakan kode batasan elemen adalah berkonsentrasi pada pengurangan dalam kesalahan ini dan akibatnya analisis umumnya berkaitan dengan diskritisasi faktor.

2. Kesalahan diskritisasi

   Geometri dan distribusi perpindahan struktur yang sebenarnya terus menerus bervariasi. Menggunakan jumlah elemen terbatas untuk model struktur dapat menerangkan kesalahan dalam pencocokan geometri dan distribusi perpindahan karena keterbatasan matematika yang melekat pada elemen.



Gambar 2. 7. Pemberian Beban pada Plat (kiri); Model Elemen Hingga (kanan)

Elemen struktur dimodelkan dengan elemen hingga dengan menerapkan tiga nodal, tegangan bidang, elemen segitiga sederhana. Tipe elemen tersebut memiliki lubang dengan dua masalah dasar. Elemen yang memiliki sisi lurus tetap lurus setelah deformasi. Regangan seluruh bidang (plane stress) elemen segitiga adalah konstan. Masalah pertama, geometri dimodelkan dengan kurva lengkung tepi. Catatan bahwa model permukaan dengan besar kelengkungan terlihat kurang dimodelkan, sedangkan permukaan lubang tampaknya cukup dimodelkan. Kemudian, regangan di berbagai daerah struktur sebenarnya berubah dengan cepat, dan konstanta elemen regangan hanya akan memberikan perkiraan dari regangan rata-rata di tengah elemen. Jadi secara singkatnya, hasil diprediksi model ini akan sangat kurang. Hasilnya dapat ditingkatkan secara signifikan dengan meningkatkan jumlah elemen (kerapatan mesh) atau menggunakan elemen yang lebih baik, seperti segiempat delapan nodal, yang lebih cocok untuk aplikasi ini, sehingga akan memberikan peningkatan hasil. Karena interpolasi fungsi orde tinggi yaitu delapan nodal elemen segiempat dapat dimodelkan lengkung tepi dan menyediakan fungsi tingkat tinggi untuk distribusi regangan.

Pada *finite element analysis* yang dilaksanakan dalam penelitian ini, energi yang terdapat pada sistem akan dianalisa demi mengetahui apabila konservasi energi berjalan seperti semestinya, dan keabsahan pemodelan dapat dibuktikan. Adapun energi-energi yang terdapat pada sistem pemodelan numerik ini adalah sebagai berikut

1. Energi Kinetik

   Energi kinetik adalah energi yang dimiliki sebuah objek disebabkan pergerakan yang dimiliki objek tersebut. Energi kinetic didefinisikan sebagai kerja yang dibutuhkan untuk mengakselerasikan tubuh suatu massa dari kondisi istirahat ke kecepatan tertentu. Setelah mendapatkan energi tersebut ketika akselerasi terjadi, tubuh massa tersebut akan terus

menjaga nilai energi tersebut, terkecuali apabia kecepatan yang dimilikinya berubah. Sejumlah kerja yang sama pun dilakukan oleh tubuh tersebut untuk melakukan deselerasi dari kecepatan tersebut ke keadaan istirahat.

2. Energi Internal

Energi internal adalah energi yang terdiri dari jumlah antara energi kinetik dan energi potensial suatu objek. Adapun energi potensial merupakan energi yang didapatkan dari interaksi antar atom pada objek tersebut. Dalam studi numerik ini, interaksi antar atom pada objek adalah respon komponen yang dimodelkan pada tumbukan. Secara fisik, interaksi antar atom pada objek dapat dinyatakan sebagai deformasi. Maka, energi internal adalah energi yang didapatkan ketika komponen berdeformasi, atau energi yang dibutuhkan untuk berdeformasi.

3. Energi Total

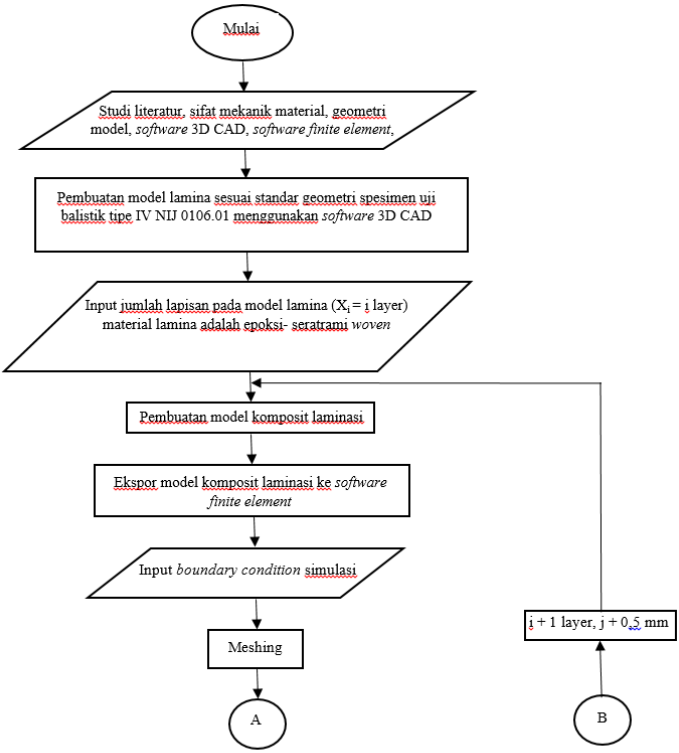
Pada finite element, energi total adalah nilai energi yang didapatkan dari penjumlahan antara energi internal, energi kontak, energi *hourglass*, dan juga energi termal suatu objek. Energi kontak adalah energi yang terdisipasi akibat terdapatnya friksi antara komponen-komponen pada objek. Energi *hourglass* adalah energi yang muncul akibat suatu bentuk permasalahan pada dikritasi model. Energi hourglass berhubungan dengan mode hourglass. Mode hourglass dapat juga disebut sebagai mode energi nol, sebab energi deformasi elemen-elemen diskritasi pada mode hourglass adalah nol. *Hourglassing* umumnya muncul pada mesh rektangular (2D) atau hexahedral (3D) dengan fungsi bentuk linear. Contohnya, apabila terdapat elemen rektangular yang ujung2nya diberikan pembebanan bending. Ketika elemen rektangular ini terdeformasi, suatu garis khayal yang menghubungkan sisi-sisi elemen pada bagian tengah tidak akan mengalami perubahan panjang, atau tidak mengalami regangan. Sehingga, tegangan pada garis atau titik integrasi tersebut adalah nol, dan energi deformasi pada lokasi tersebut pun

adalah nol. Hal ini tentu tidak sesuai dengan realita, sehingga perangkat lunak *finite element* umumnya selalu mengukur berapa energi yang hilang akibat fenomena tersebut, dan energi tersebut yang dinamakan sebagai *hourglass energy*. Namun, keberadaan energi hourglass adalah sesuatu yang umumnya dihindari, untuk mendapatkan akurasi hasil yang lebih baik. Penggunaan orde elemen yang lebih tinggi, diskritasi menggunakan *meshing* yang sangat halus, penggunaan tipe *meshing* tetrahedral *solid* atau triangular *shell*, dan pembebanan yang dibuat merata adalah salah satu cara dimana operator dapat mengikis energi hourglass

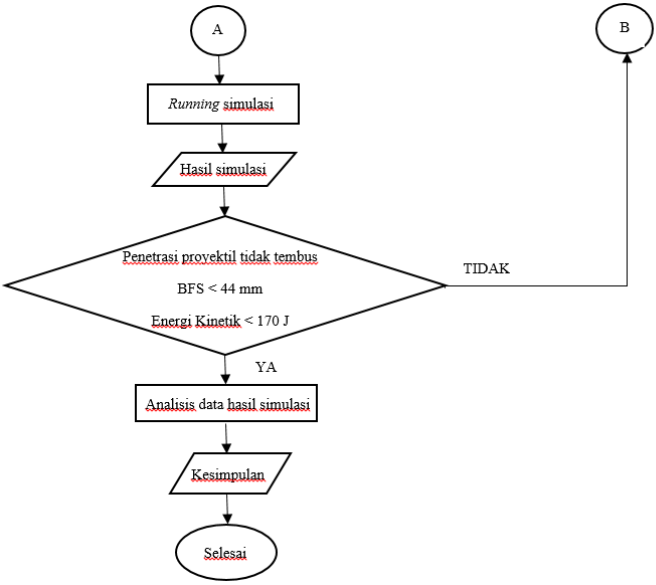
BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penilitian

Agar penelitian berjalan dengan baik dan sistematis, diperlukan adanya diagram alir yang menggambarkan alur penelitian. Diagram alir mencakup rangkaian penelitian secara umum maupun subbagian yang terdapat di dalamnya



Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian 1



Gambar 3. 2. Diagram Alir Penelitian 2

3.3. Material dan Bahan

Studi literatur bertujuan untuk memperoleh informasi dan dasar referensi dari penelitian yang dilakukan. Adapun informasi yang digunakan sebagai *input* dalam melakukan penelitian adalah sebagai berikut :

1. Komposit epoksi-serat rami

   Epoxy merupakan suatu polimer *thermosett* yang berfungsi sebagai matriks atau pengikat dari penguat yang kemudian akan dipadukan kedalamnya. Serat rami adalah serat alam berbasis selulosa yang berpotensi untuk memiliki sifat mekanik sebanding dengan serat aramid ternama. Pada penelitian ini, komposit epoksi-serat rami *woven* akan dimodelkan menggunakan perangkat lunak *finite element* untuk mensimulasikan pengujian balistik dengan standar NIJ 0106.01 tipe IV. Adapun sifat mekanik yang digunakan pada

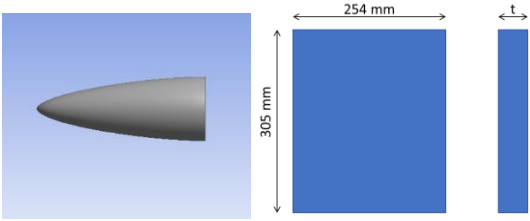
penelitian ini didapatkan dari konsorsium penelitian komposit rami.

Tabel 3. 1. Sifat Mekanik Komposit Epoksi-Serat Rami Woven, Konsorsium Penelitian Komposit Rami

Sifat Mekanik	
Density	7850 kg/m^3
Young's Modulus	200 Gpa
Poisson's Ratio	0,3
Bulk Modulus	166,67 GPa
Shear Modulus	76,923 Gpa
Ultimate Tensile Strength	480 MPa
Yield Strength	250 MPa
Specific Heat	434 J/kg.C

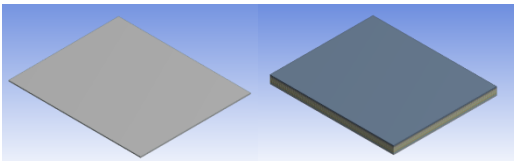
3.4 Model Uji Panel Komposit Tahan Balistik Tipe IV

Geometri model uji panel anti peluru yang digunakan mengacu pada NIJ 0101.06. Peluru yang digunakan dalam pengujian merupakan peluru *Armor Piercing* 7,62 mm, atau peluru yang biasa digunakan pada senjata api laras panjang. *Properties* material yang diterapkan pada model disesuaikan dengan material yang akan digunakan pada pengujian eksperimental. Adapun geometri model uji tercantum pada gambar berikut



(a) (b)

Gambar 3. 3. Model Proyektil (a) dan Geometri Spesimen (b)



(c) (d)

Gambar 3. 4. Model Lamina (c) dan Model Laminat 10 lapis (d)

3.5. Simulasi

Simulasi pengujian NIJ 0101.06 terhadap panel anti peluru menggunakan perangkat lunak *finite element.* Adapun gambaran langkah-langkah simulasi adalah sebagai berikut:

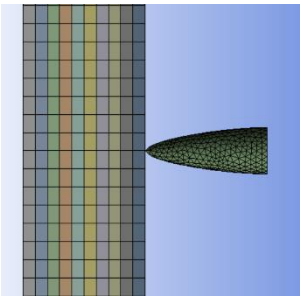
1. Pembuatan model

   Geometri model uji proyektil dan rompi anti peluru mengacu pada ketentuan NIJ 0101.06. Pembuatan model menggunakan perangkat lunak 3D-CAD. Selanjutnya, dilakukan proses *assembly* terhadap model panel dan peluru sesuai dengan ketentuan NIJ 0101.06. Setelah itu, model uji peluru dan panel anti peluru di-*export* ke dalam perangkat lunak *finite element*.

2. *Material and properties*

   Nilai properties material dimasukkan ke dalam sub menu engineering data pada perangkat lunak *finite element*.

3. *Meshing*

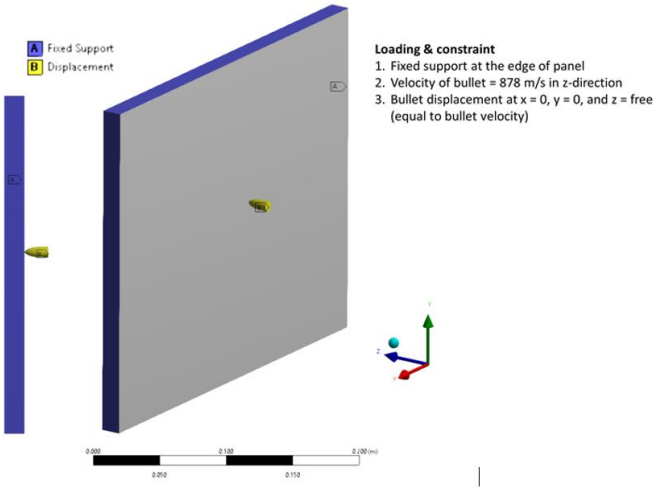


Gambar 3. 5. Meshing Pada Model Proyektil dan Pelat Laminat

Meshing atau penentuan simpul – simpul pengamatan suatu komponen yang terhubung satu sama lain (*nodes*). Pemilihan meshing ditujukan untuk mengatur tingkat keakuratan hasil simulasi.

4. *Boundary Conditions*

Pada *boundary condtion*, dilakukan pengkondisian area-area *fixed support*, *displacement* dan pemberian initial condition seperti kecepatan yang bekerja pada peluru *Armor Piercing* seperti pada gambar berikut



Gambar 3. 6. *Boundary Condition* Pemodelan

Pemberian kondisi *fixed support* pada permukaan di keempat sisi panel anti peluru, hal tersebut dilakukan agar panel tidak ikut bergerak ketika dikenai peluru. Kemudian, kondisi *displacement* diberikan pada model proyektil peluru, dimana pemberian arah *displacement* pada sumbu x dan y diangap nol dan *displacement* pada sumbu z dianggap bebas. Hal tersebut dilakukan untuk melihat arah *displacement* peluru hanya pada sumbu z atau tepat mengarah ke panel anti peluru.

5. *Running*

Proses running dilakukan untuk mendapatkan hasil simulasi. Adapun proses running menggunakan *analysis system explicit dynamic*, dengan *solver* energi kinetik pada *body* peluru, solver energi total pada keseluruhan body pelat, solver energi internal pada keseluruhan body pelat, solver energi kinetik pada keseluruhan body pelat, serta solver energi total pada masing-masing body setiap lapisan pada pelat. Kemudian, *result* deformasi total pada pelat, result *directional deformation* ke arah sumbu y pada peluru, dan result *directional deformation* ke arah sumbu y pada permukaan belakang lapisan terakhir pelat serta *result equivalent stress* pada *body* lapisan terakhir pelat pun digunakan.

6. Analisa hasil simulasi

Analisa hasil simulasi ditujukan untuk memperoleh konfigurasi komposit lamina yang memenuhi ketentuan NIJ 0101.06. Dari konfigurasi yang didapatkan, dipilih konfigurasi dengan massa paling kecil untuk selanjutnya dilakukan pembuatan *prototype*

BAB IV
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Hasil Simulasi

Tabel 4. 1. Hasil Simulasi

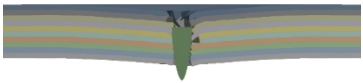
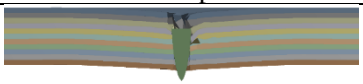
No	Jumlah Lapisan Pelat	Tebal Pelat (mm)	Dalam Penetrasi (mm)	Ket.	*Backface Signature* (mm)
1	10	20	28,381	Tembus	-
2	11	22	28,080	Tembus	-
3	12	24	27,765	-	5,42
4	13	26	27,822	-	2,47
5	14	28	27,767	-	1,60
6	15	30	27,690	-	1,33
7	16	32	27,637	-	1,08
8	17	34	27,852	-	0,92
9	18	36	27,753	-	0,76
10	19	38	27,764	-	0,6597
11	20	40	27,833	-	0,6577

Nilai-nilai yang terdapat pada tabel 4.1 diukur bertepatan dengan waktu dimana energi kinetik pelat mencapai nilai nol, atau ketika peluru kehilangan kecepatannya. Hal ini dilakukan agar komparasi nilai dapat dilakukan berdasarkan pada kondisi yang serupa antara satu variasi pelat dengan yang lainnya. Adapun ketebalan setiap lapisan pada pelat adalah sebesar 2 mm, sehingga ketebalan total pelat adalah 2mm dikalikan jumlah lapisan yang terdapat pada pelat. Kedalaman penetrasi merupakan jarak yang berhasil ditempuh oleh peluru dari permukaan lapisan pertama pelat sampai dengan akhirnya peluru tersebut kehilangan kecepatan atau energi kinetiknya. *Backface signature* (BFS) adalah nilai indentasi tertinggi pada permukaan belakang pelat yang tidak terpeforasi oleh peluru. Oleh karena itu, disebabkan pelat 10 dan 11 lapis memiliki status berhasil ditembus oleh peluru, maka

keduanya tidak memerlukan pengukuran BFS. Kemudian, dalam konteks pemodelan numerik ini, BFS pada pelat didapatkan dengan mengukur *directional deformation* permukaan lapisan paling belakang pelat, pada arah yang sesuai dengan pergerakan peluru. Lalu, pada pemodelan numerik ini, disebabkan peluru bergerak sejajar dengan sumbu koordinat y, maka BFS didapatkan dengan mengukur *directional deformation* pada permukaan lapisan paling belakang pelat, pada sumbu yang tersebut. Berdasarkan tabel 4.1, diketahui jumlah lapisan pada setiap variasi pelat, ketebalan total setiap variasi pelat, kedalaman penetrasi pada setiap pelat, status apabila peluru berhasil menembus pelat, dan juga nilai *backface signature* pada setiap variasi pelat.

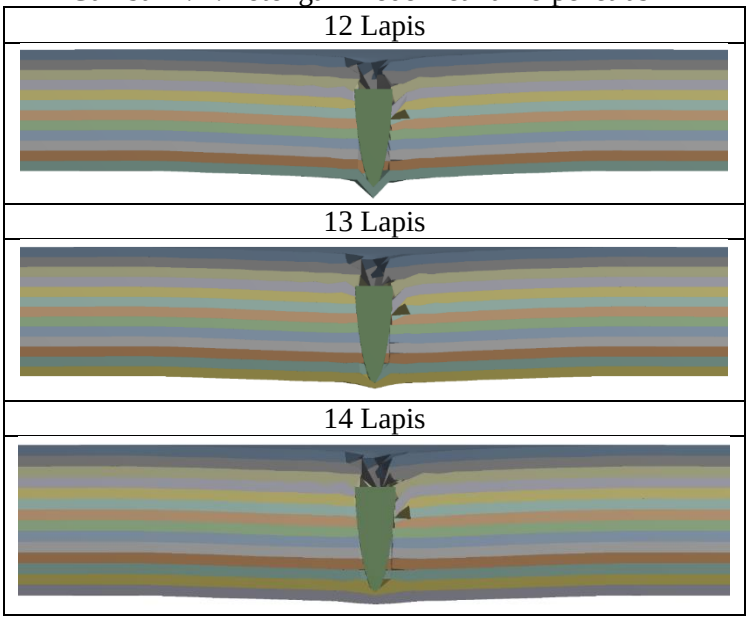
4.2. Penetrasi dan BFS pada Pelat

Gambar 4. 1. Potongan Model ketika Terpenetrasi 1

10 Lapis	11 Lapis
	

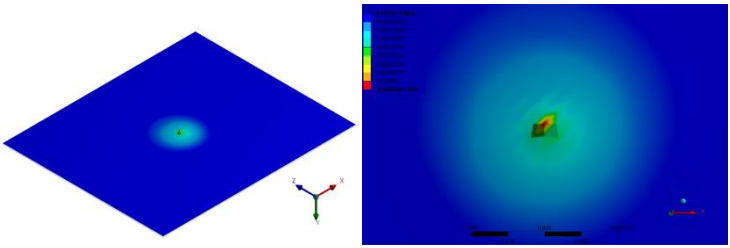
Pada gambar 4.1 terlihat tampak samping potongan model pelat 10 dan 11 lapis. Peluru terlihat jelas telah berhasil menembus kedua pelat tersebut ketika mencapai kedalaman penetrasi maksimumnya. Hal ini telah memberikan konfirmasi visual bahwa kedua pelat tersebut telah gagal memenuhi standar NIJ 0101.06 yang menspesifikkan bahwa spesimen uji tidak diperbolehkan ditembus oleh proyektil uji. Karena kedua pelat telah berhasil ditembus peluru, nilai BFS kedua pelat pun tidaklah diukur. Hal ini disebabkan bahwa NIJ 0101.06 menspesifikkan bahwa nilai BFS hanya dapat dipertimbangkan apabila spesimen uji tidaklah berhasil ditembus oleh peluru. Kasus pada pelat 10 dan 11 lapis memperlihatkan keadaan dimana nilai kedalaman penetrasi yang melebihi ketebalan pelat merupakan suatu indikasi dimana peluru berhasil menembus keseluruhan pelat, dan nilai-nilai pada tabel 4.1 dan gambar pada gambar 4.1 telah membuktikan hal tersebut.

Gambar 4. 2. Potongan Model ketika Terpenetrasi 2

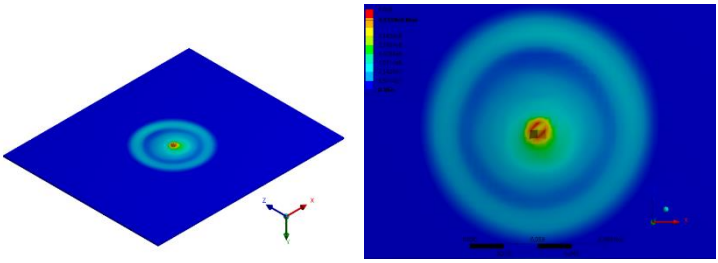


Gambar 4.2 memperlihatkan gambar tampak samping model pelat 12, 13, dan 14 lapis yang terpenetrasi oleh peluru pada kedalaman maksimumnya. Mengikuti fenomena pada pelat 10 dan 11 lapis, nilai kedalaman penetrasi sebesar 27,765 mm yang terdapat pada tabel 4.1, pelat 12 lapis seharusnya mengindikasikan bahwa pelat telah berhasil ditembus peluru. Namun gambar 4.2 memperlihatkan bahwa ternyata lapisan terakhir pada pelat 12 lapis telah berhasil menahan laju peluru, sehingga pelat tidak berhasil ditembus. Adapun lapisan terakhir tersebut telah mengalami deformasi yang cukup ekstrim untuk menghentikan laju peluru. Walaupun begitu, disebabkan peluru yang tidak berhasil menembus pelat, maka nilai BFS pada pelat 12 lapis dapat dipertimbangkan. Diketahui bahwa pelat 12 lapis memiliki nilai BFS sebesar 5,42 mm. Apabila nilai BFS tersebut ditambahkan kepada nilai ketebalan awal pelat, diketahui bahwa nilai yang

dihasilkan adalah sebesar 27,42 mm, nyaris memenuhi nilai kedalaman penetrasi maksimum peluru pada pelat sebesar 27,765. Adapun perbedaan nilai diantara keduanya sebesar 0,345 mm diyakini adalah penurunan nilai ketebalan lapisan terakhir pelat akibat impak peluru terhadapnya. Hal ini merupakan suatu pembuktian lebih lanjut bahwa nilai kedalaman penetrasi yang melebihi ketebalan pelat ternyata tidaklah cukup untuk dijadikan sebuah indikasi dimana peluru berhasil menembus keseluruhan pelat. Namun, disebabkan terdapatnya deformasi yang cukup signifikan pada lapisan terakhir pelat tersebut, terdapat kekhawatiran apabila lapisan tersebut sebenarnya sedang menerima tegangan dan/atau regangan yang kemungkinan dapat menyebabkan kegagalan. Oleh karena itu, untuk mengetahui apabila pelat tersebut dapat dinyatakan aman atau tidak, maka diperlukan analisis lebih lanjut mengenai area deformasi pada lapisan terakhir pelat, dan juga tegangan yang dialami oleh oleh lapisan tersebut.



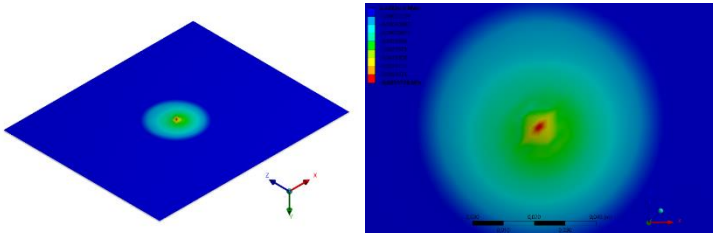
Gambar 4. 3. Area dan nilai BFS pada Pelat 12 Lapis



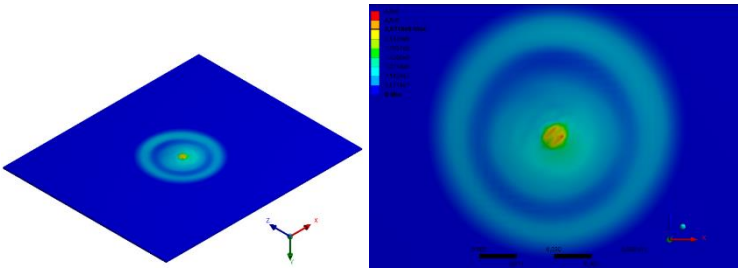
Gambar 4. 4. Tegangan pada Lapisan Terakhir Pelat 12 Lapis

Pada gambar 4.2, terlihat area serta nilai BFS yang diukur menggunakan solver *directional deformation* searah sumbu y pada permukaan belakang lapisan terakhir pelat 12 lapis. Deformasi tersebut terjadi akibat tumbukan peluru pada lapisan pertama, yang kemudian memberikan reaksi berantai terhadap lapisan-lapisan dibelakangnya. Penting untuk diketahui bahwa disebabkan peluru yang bergerak searah terhadap sumbu y negatif, maka nilai deformasi terbesar pun memiliki notasi negatif. Disebabkan notasi negatif tersebut, maka nilai deformasi terbesar yang terdapat pada permukaan lapisan terakhir tersebut adalah nilai minimum yang terukur pada skala warna. Pelat 12 lapis ini memiliki nilai BFS sebesar 5,42 mm. Disebabkan standar maksimum nilai BFS pada NIJ 0101.06 adalah sebesar 44 mm, maka pelat 12 lapis dapat dinyatakan tetap memenuhi kriteria yang ada, walaupun terdapat deformasi yang relatif ekstrim dibandingkan permukaan belakang pada variasi pelat lainnya. Walaupun begitu, mengingat deformasi yang cukup ekstrim, maka ada baiknya dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui apabila deformasi pada pelat 12 lapis sudah dapat diklasifikan sebagai suatu bentuk kegagalan atau belum. Gambar 4.4 memperlihatkan area tegangan yang terjadi pada lapisan terakhir pelat 12 lapis, di waktu yang serupa dimana BFS telah dievaluasi sebelumnya. Sebelumnya, penting untuk diketahui bahwa skala warna oranye telah diatur sedemikian rupa agar memperlihatkan area yang memiliki nilai tegangan melebihi tegangan *yield* material, dan skala warna merah memperlihatkan area yang memiliki nilai tegangan melebihi tegangan maksimum material. Nilai tegangan terbesar yang terjadi pada lapisan tersebut adalah sebesar 431,5 MPa. Mengingat bahwa masing-masing nilai tegangan *yield* dan maksimum material adalah sebesar 250 MPa dan 480 MPa, maka tegangan tersebut masih dapat diklasifikasikan sebagai tegangan yang tidak menggagalkan material. Namun, segala deformasi yang terjadi pada area yang berwarna oranye dan merah maka dapat diklasifikasikan sebagai deformasi gabungan antara elastis dan plastis. Hal ini disebabkan pada waktu dimana

seluruh nilai tegangan dan deformasi diukur, peluru baru saja berhenti bergerak. Kondisi tersebut mengindikasikan proses pembebanan yang masih berlangsung. Disebabkan proses pembebanan masih berlangsung, maka fenomena *elastic strain recovery* belumlah terjadi, sehingga regangan yang terjadi masih berupa regangan gabungan, dan deformasi yang terjadi pun merupakan deformasi gabungan. Adapun dari regangan gabungan tersebut, disebabkan tegangan yang diterima area tertentu pada pelat telah mendekati nilai tegangan maksimum material, maka regangan plastis yang terjadi pada area tersebut pastilah hampir mendekati nilai *strain limit* material pula. Sehingga, apabila diasumsikan terdapat peluru kedua yang ditembakkan dan pelat tersebut kembali ditumbuk, maka kemungkinan besar pelat tersebut akan mengalami kegagalan. Oleh karena itu, walau sebenarnya pelat dengan jumlah lapisan 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, dan 20 sudah dapat dinyatakan telah memenuhi standar NIJ 0101.06, ada baiknya dilakukan analisis lebih lanjut mengenai energi kemampuan penyerapan energi pada tiap variasi pelat. Analisis lebih lanjut tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai seberapa baik kinerja pelat dalam melaksanakan fungsinya sebagai material tahan balistik tipe IV.



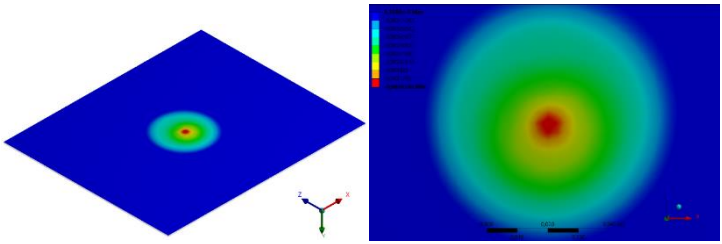
Gambar 4. 5. Area dan Nilai BFS pada Pelat 13 Lapis



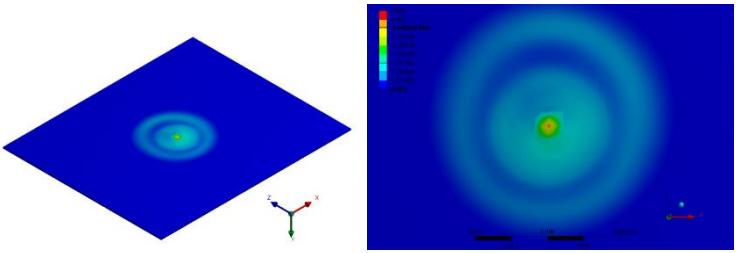
Gambar 4. 6. Tegangan pada Lapisan Terakhir Pelat 13 Lapis

Pada gambar 4.2, terlihat bahwa pelat 13 dan 14 lapis pun telah berhasil menahan laju peluru tanpa terjadinya kondisi tembus. Diketahui pada tabel 4.1 bahwa penambahan satu lapisan tambahan dari 12 lapis menjadi 13 lapis dapat mengurangi nilai BFS yang dihasilkan penetrasi peluru sebesar lebih dari 54,4%. Penurunan tersebut merupakan penurunan nilai BFS terbesar yang didapatkan dengan penambahan satu lapisan tambahan pada penelitian ini. Hal ini disebabkan bahwa walaupun pelat 12 lapis berhasil membuat peluru tidak menembusnya, pelat tersebut sebenarnya hampir mengalami kegagalan yang diindikasikan dengan terdapatnya tegangan yang sangat mendekati nilai tegangan maksimum material pada lapisan terakhir tersebut. Sehingga, dengan ditambahkannya satu lapisan tambahan, alhasil pelat mendapatkan peningkatan nilai kekakuan dan ketangguhan yang cukup untuk mengurangi nilai BFS secara signifikan. Pada gambar 4.2 pun terlihat bahwa pada pelat 13 lapis, lapisan ke 12 pada pelat tersebut mengalami kegagalan. Namun, terjadinya kegagalan pada lapisan ke 12 tersebut diyakini cukup untuk menahan laju peluru secara signifikan, sehingga lapisan terakhir pada pelat 13 lapis dapat menerima sisa-sisa energi peluru tanpa perlu berdeformasi dengan cukup ekstrim. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.5, bahwa deformasi pada permukaan belakang lapisan terakhir pelat 13 lapis memiliki area yang lebih luas. Area deformasi tersebut pun mengindikasikan bahwa lapisan terakhir pada pelat 13 lapis dapat memanfaatkan luasan yang lebih besar dalam menyerap energi balistik peluru, sehingga dapat dinyatakan lebih efektif dalam

aplikasinya. Gambar 4.5 pun memperlihatkan bahwa kontur deformasi pada pelat 13 lapis tidaklah memiliki sudut-sudut tajam layaknya pada pelat 12 lapis. Berbeda dengan pelat 12 lapis, gambar 4.6 memperlihatkan bahwa nilai tegangan terbesar pada lapisan terakhir pelat 13 lapis baru saja melewati nilai tegangan *yield* material. Nilai tegangan terbesar pada lapisan terakhir pelat 13 lapis adalah sebesar 267,1 MPa, sedangkan nilai tegangan yield komposit laminat epoksi-rami *woven* adalah sebesar 250 MPa. Perbedaan nilai sebesar 171 MPa ini mengindikasikan bahwa lapisan terakhir pelat baru saja memasuki daerah regangan plastis. Sehingga, deformasi yang terjadi pun serupa dengan yang terjadi pada pelat 12 lapis, yaitu deformasi gabungan antara elastis dan plastis. Namun, penting untuk diketahui bahwa deformasi plastis yang dimiliki oleh lapisan terakhir pelat 13 lapis dapat dipastikan memiliki nilai jauh lebih kecil dibandingkan pada pelat 12 lapis. Oleh karena itu, khusus pada kasus penambahan satu lapisan dari 12 menjadi 13 lapis, diketahui efeknya dapat memberikan penurunan nilai tegangan pada lapisan terakhir pelat secara signifikan. Adapun nilai penurunan tersebut adalah sebesar 38%, tepatnya sebesar 164,4 MPa. Penambahan lapisan ini pun diketahui dapat membuat status pelat yang awalnya berada diambang batas kegagalan komponen, menjadi komponen yang baru saja melewati tegangan yield materialnya.



Gambar 4. 7. Area dan Nilai BFS pada Pelat 14 Lapis



Gambar 4. 8. Tegangan pada Lapisan Terakhir Pelat 14 Lapis

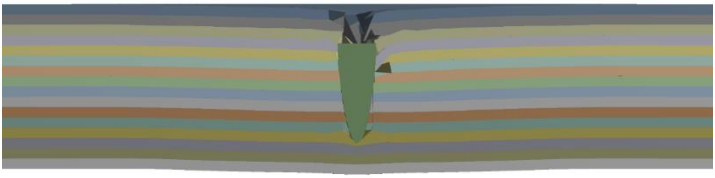
Dapat dilihat pada gambar 4.2, bahwa pelat 14 lapis secara praktis hanyalah pelat 13 lapis dengan nilai BFS yang sedikit lebih kecil. Dari gambar 4.2 pun diketahui bahwa pelat 14 lapis adalah variasi pelat pertama dimana lapisan terakhirnya tidaklah mengalami kontak langsung dengan peluru yang melakukan penetrasi. Hal ini membuat terdapatnya penurunan nilai BFS yang cukup signifikan, walaupun tidaklah sebesar penurunan nilai BFS dari pelat 12 lapis ke pelat 13 lapis. Nilai BFS pelat 14 lapis adalah sebesar 1,60 mm. Nilai tersebut merupakan penurunan sebesar 35% dari nilai BFS pelat 12 lapis, dan penurunan sebesar 70,5% dari nilai BFS pelat 12 lapis. Gambar 4.7 memperlihatkan bahwa kontur deformasi memiliki persebaran yang lebih teratur, khususnya pada area yang berwarna kuning dan oranye. Hal ini mengindikasikan bahwa lapisan terakhir pelat dapat menyerap dan menyebar energi balistik peluru dengan lebih baik dibandingkan variasi-variasi pelat dengan jumlah lapisan yang lebih sedikit. Hal layak diperhatikan juga adalah area berwarna biru muda terlihat memiliki luas yang jauh lebih kecil dibandingkan pada pelat 13 dan 12 lapis, Hal ini memperlihatkan bahwa area yang memiliki *directional deformation* searah sumbu y pada pelat 14 lapis tidaklah memiliki nilai yang begitu besar, khususnya apabila dibandingkan dengan pelat 13 dan 12 lapis. Gambar 4.8 memperlihatkan area dan nilai tegangan pada lapisan terakhir pelat 14 lapis. Diketahui bahwa nilai tegangan terbesar adalah 264,2 MPa. Nilai tersebut tidaklah memiliki perbedaan signifikan terhdap nilai tegangan terbesar pada pelat 13 lapis. Namun, dengan

perbedaan nilai tegangan yang hanya sebesar 2,9 MPa atau 1,08%, telah diketahui bahwa BFS yang dimiliki pelat 14 lapis menurun sebesar 35% dibandingkan BFS pelat 13 lapis. Hal ini mengindikasikan penambahan satu lapisan dari pelat 13 lapis menjadi 14 lapis akan memberikan efek pendispersian energi yang lebih baik pada lapisan terakhir, walaupun tegangan yang dialami oleh kedua lapisan terakhir pelat tidaklah memiliki nilai yang jauh berbeda.

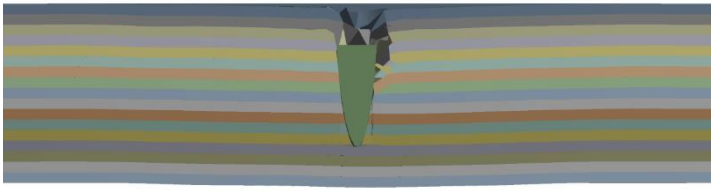
Gambar 4. 9. Potongan Model ketika Terpenetrasi 3

15 Lapis

16 Lapis

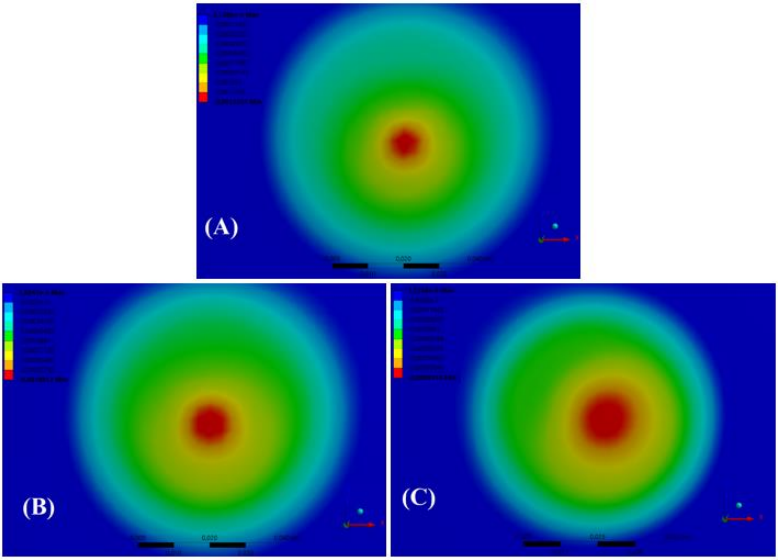


17 Lapis



Gambar 4.9 memperlihatkan gambar tampak samping pelat 15, 16, dan 17 lapis yang dipenetrasi peluru pada saat kedalaman maksimumnya. Berdasarkan tabel 4.1, nilai masing-masing BFS pada pelat adalah sebesar 1,33 mm, 1,08mm, dan 0,92mm. Masing-masing nilai tersebut merepresentasikan

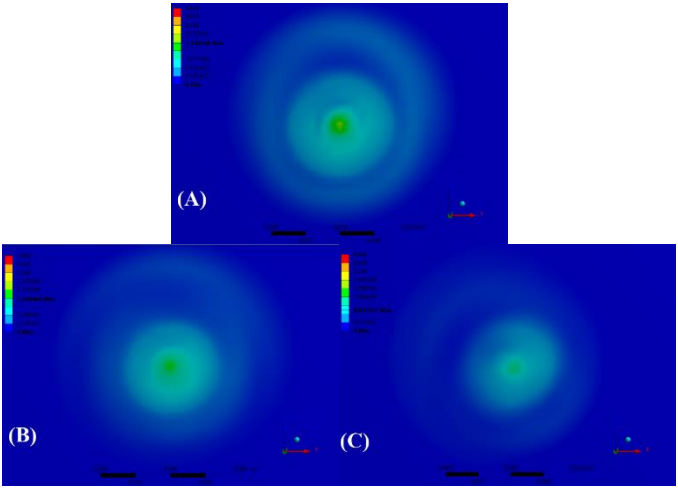
penurunan nilai sebesar 16%, 18%, dan 19% dari nilai BFS pada pelat dengan satu jumlah lapisan lebih sedikit. Adapun gambar 4.9 memperlihatkan pula bahwa peluru terhenti pada lapisan ke 13 pada pelat 15 dan juga 16 lapis. Namun, peluru diketahui berhasil menembus lapisan ke 13, dan akhirnya terhenti di lapisan ke 14 pada pelat 17 lapis.



Gambar 4. 10. Area dan Nilai BFS pada Pelat (A) 15 Lapis, (B) 16 Lapis, (C) 17 Lapis

Gambar 4.10 memperlihatkan area deformasi pada permukaan belakang lapisan terakhir pelat 15, 16, dan 17 lapis. Terlihat bahwa ketiga pelat memiliki kontur warna deformasi yang cukup berbeda. Adapun dengan bertambahnya jumlah lapisan, area berwarna hijau terlihat semakin luas dan juga terlihat memiliki perimeter yang semakin jelas. Hal ini pun berlaku untuk warna kuning, oranye, dan merah. Penjelasan tersebut mengindikasikan bahwa deformasi yang terjadi pada setiap pelat makin tersebar merata, dan ekstrimitas akibat terdapatnya pemusatan berlebih

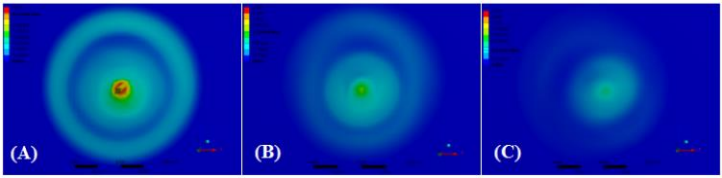
pada deformasi yang terjadi layaknya yang ditemukan pada pelat 12 dan 13 lapis tidaklah ditemukan.



Gambar 4. 11. Tegangan Lapisan Terakhir pada Pelat (A) 15 Lapis, (B) 16 Lapis. (C) 17 Lapis

Gambar 4.11 memperlihatkan area dan nilai tegangan yang terdapat pada lapisan terakhir pelat 15, 16, dan 17 lapis. Adapun masing-masing nilai tegangan tersebut adalah 173,8 MPa untuk pelat 15 lapis, 138,6 MPa untuk pelat 16 lapis, dan 86,1 MPa untuk pelat 17 lapis. Terdapat perbedaan nilai yang cukup signifikan pada setiap penambahan jumlah pelat. Masing-masing nilai tegangan tersebut merepresentasikan penurunan sebesar 29,4%, 20,25, dan 37,88% dari nilai tegangan di lapisan terakhir pada pelat dengan satu jumlah lapisan lebih sedikit. Gambar 4.8 pun memperlihatkan bahwa pada ketiga variasi pelat ini, hanya terdapat area yang berwarna hijau, biru muda, dan biru tua. Disebabkan warna oranye adalah warna yang mengindikasikan bahwa area tertentu pada pelat tengah menerima nilai tegangan diatas tegangan *yield*, maka dapat disimpulkan pula bahwa seluruh regangan yang terjadi pada lapisan terakhir ketiga pelat tersebut hanyalah regangan elastis.

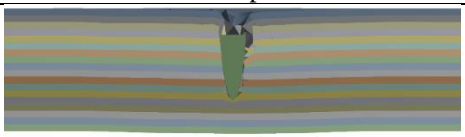
Sehingga deformasi yang terjadi lapisan terakhir ketiga pelat tersebut pun dapat dinyatakan sebagai deformasi elastis pula. Oleh sebab itu, seiring berjalannya waktu, deformasi tersebut akan hilang dan permukaan belakang lapisan terakhir pelat akan kembali ke bentuk asalnya. Hal ini dapat mengurangi lebih lanjut nilai BFS sebenarnya yang dimiliki oleh ketiga pelat, disebabkan nilai BFS tersebut hanya akan dipengaruhi oleh deformasi plastis lapisan-lapisan yang terdapat sebelum lapisan terakhir.

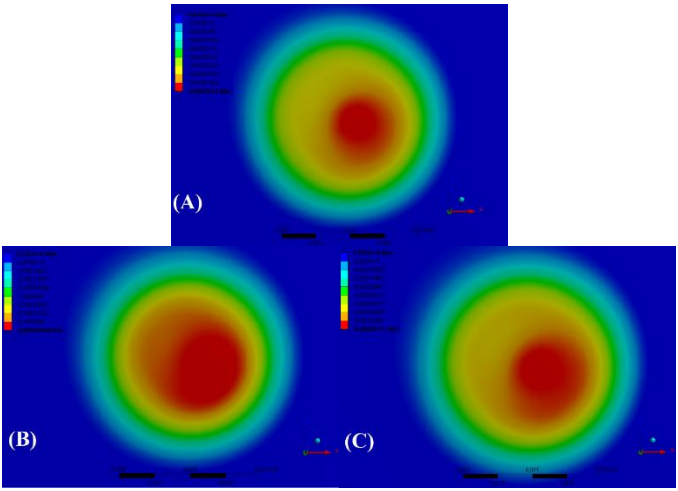


Gambar 4. 12. Perbedaan Kontur Tegangan Lapisan Terakhir Pelat (A) 12 Lapis, (B) 15 Lapis, (C) 17 Lapis

Gambar 4.12 memperlihatkan terdapatnya perbedaan kontur warna tegangan pada lapisan terakhir pelat yang cukup signifikan terhadap penambahan pelat. Khususnya adalah hilangnya area lingkaran terluar yang berwarna biru muda seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan pelat. Disebabkan nilai tegangan selalu berbanding terbalik dengan nilai deformasi, hal ini sebenarnya memberikan pembuktian lebih lanjut bahwa seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan pada pelat, ekstrimitas baik dalam konteks tegangan maupun deformasi pada permukaan belakang lapisan terakhir pelat akan semakin menghilang. Sehingga nilai tegangan maupun deformasi dapat tersebar secara lebih merata pada suatu area, tanpa munculnya efek “gelombang” pada area tersebut.

Gambar 4. 13. Potongan Model ketika Terpenetrasi 4

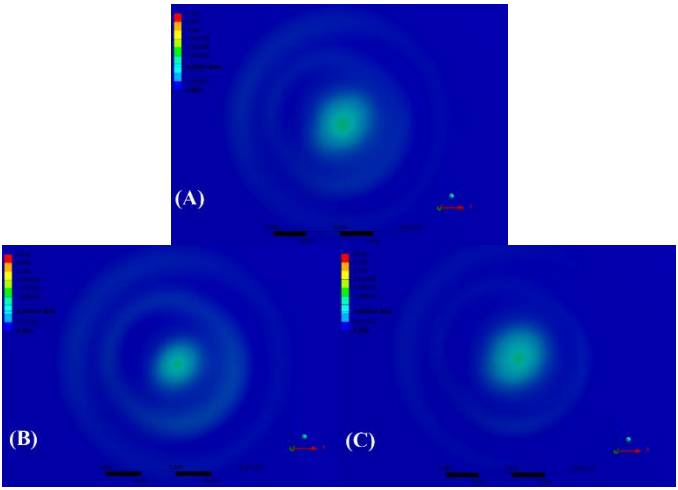
18 Lapis	
	
19 Lapis	20 Lapis



Gambar 4. 14. Area dan Nilai BFS pada Pelat (A) 18 Lapis, (B) 19 Lapis, (C) 20 Lapis

Gambar 4.13 memperlihatkan tampak samping pelat 18, 19, dan 20 lapis ketika peluru mencapai kedalaman penetrasi maksimumnya. Perbedaan yang terlihat diantara ketiganya adalah peluru belum menembus lapisan ke 13 pada pelat 18 lapis,

sedangkan peluru telah berhenti pada permukaan lapisan ke 14 pada pelat 19 dan 20 lapis. Berdasarkan tabel 4.1, diketahui bahwa nilai BFS masing-masing pelat 18, 19, dan 20 lapis adalah 0,76 mm, 0,6597 mm, dan 0,6577 mm. Masing-masing nilai BFS tersebut merepresentasikan penurunan sebesar 17,4%, 13,2%, dan 0,3% dari nilai BFS pelat dengan satu jumlah lapisan lebih sedikit. Gambar 4.14 memperlihatkan area pada permukaan belakang lapisan terakhir pelat 18, 19, dan 20 lapis yang terpengaruhi deformasi. Diketahui bahwa area berwarna biru muda dan hijau mulai berpindah ke tepi lingkaran dan perimeter kedua area tersebut terlihat semakin jelas. Area berwarna kuning dan merah pun terlihat memiliki luasan yang lebih besar dibandingkan variasi-variasi pelat sebelumnya. Sebelumnya, telah diketahui bahwa area yang dimiliki warna-warna yang sebelumnya memiliki luasan kecil akan bertambah besar seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan. Namun, terlihat bahwa area berwarna merah pada pelat 20 lapis justru mengecil apabila dibandingkan dengan area berwarna merah pada pelat 19 lapis. Hal ini mungkin disebabkan lapisan terakhir pada pelat 20 lapis telah berada pada jarak yang cukup jauh relatif terhadap kedalaman penetrasi maksimum peluru. Sehingga, dalam konteks *directional deformation* searah sumbu y, lapisan terakhir tersebut tidak begitu terpengaruhi efek tumbukan peluru. Hal ini memiliki korelasi dengan penurunan nilai BFS pelat 20 kapis yang hanya sebesar 0,3% dari pelat 19 lapis. Sedangkan, variasi-variasi pelat sebelumnya memiliki nilai penurunan BFS dalam rentang 40-10%.

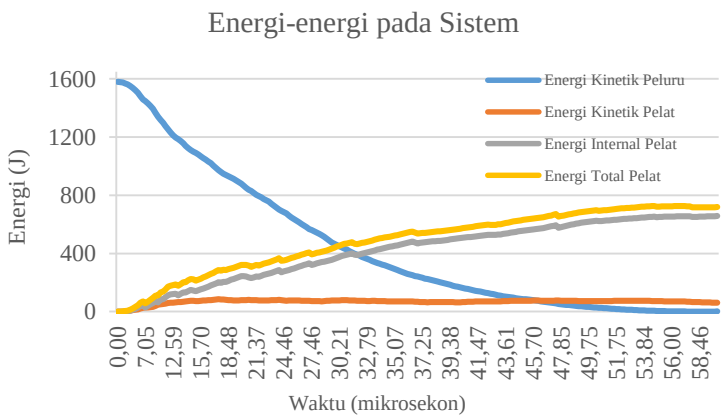


Gambar 4. 15. Tegangan Lapisan Terakhir pada Pelat (A) 18 Lapis, (B) 19 Lapis, (C) 20 Lapis

Gambar 4.15 memperlihatkan area yang terpengaruhi tegangan pada lapisan terakhir pelat 18, 19, dan 20 Lapis. Adapun nilai tegangan terbesar pada pelat 18 lapis adalah 98,67 MPa, pada pelat 19 lapis adalah 81,82 MPa, dan pada pelat 20 lapis adalah 78,35 MPa. Nilai tegangan pada pelat 18 lapis merepresentasikan kenaikan nilai sebesar 15,6% dari nilai tegangan pada pelat 17 lapis. Dan nilai tegangan pada pelat 19 serta 20 lapis merepresentasikan penurunan nilai tegangan masing-masing sebesar 17% dan 4,2% dari nilai tegangan pada pelat dengan satu jumlah lapisan lebih sedikit. Berdasarkan tabel 4.2a, 4.2b, 4.2c, dan 4.2d, telah diketahui bahwa pelat 17, 19, dan 20 lapis adalah variasi-variasi dimana peluru berhasil menembus lapisan ke 13 pada pelat. Sedangkan, walaupun terdapat deformasi yang cukup signifikan pada lapisan terkait, pelat 18 lapis berhasil menghentikan peluru pada lapisan ke 13, tanpa merusak lapisan tersebut. Hal inilah yang menyebabkan terdapatnya kenaikan nilai tegangan pada lapisan terakhir, antara pelat 17 dan 18 lapis. Disebabkan lapisan ke 13 pada pelat 17 telah berhasil ditembus

peluru, maka *strain energy* yang terdapat pada lapisan tersebut telah dilepaskan kepada lingkungan. Bersamaan dengan dilepaskannya *strain energy* pada lapisan tersebut, sejumlah energi balistik yang ditransformasikan menjadi energi deformasi pada lapisan yang tersisa pun berkurang dengan cukup signifikan. Sehingga, lapisan ke 14 sampai dengan 15 pada pelat 17 lapis tidak perlu bekerja lebih giat untuk menyerap energi balistik peluru yang tersisa. Oleh karena itu, tegangan pada lapisan terakhir pelat 17 lapis pun memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan pelat 18 lapis. Adapun pada pelat 19 dan 20 lapis, diketahui bahwa lapisan ke 13 telah ditembus, sehingga fenomena kenaikan nilai tegangan layaknya yang terjadi pada peningkatan jumlah lapisan pelat dari 17 ke 18 lapis pun tidak terjadi.

4.3. Transformasi Energi



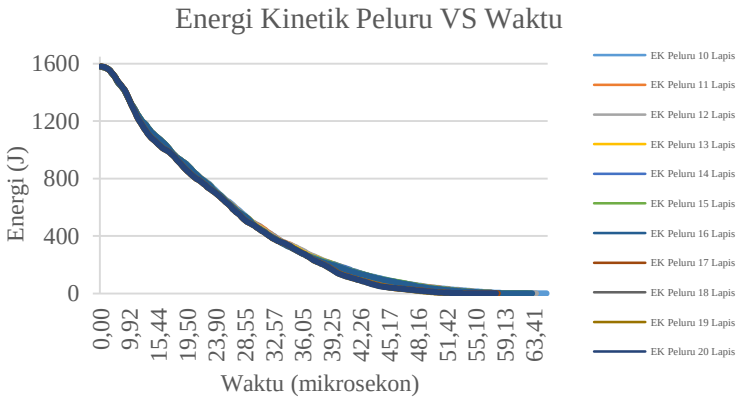
Gambar 4. 16. Energi-Energi Pada Pelat 15 Lapis

Peluru yang ditembakkan kepada pelat tentunya memiliki energi. Dalam hal ini, peluru memiliki energi kinetik yang berbanding lurus dengan massa dan kecepatan peluru. Dalam aplikasi sebuah material sebagai material tahan balistik, material tersebut diekspektasikan untuk menerima seluruh energi balistik

dan menyerapnya, agar objek atau subjek yang dilindunginya dapat terus berada dalam kondisi yang aman. Adapun penyerapan energi yang dimaksud dilakukan dengan mentransformasikan energi balistik menjadi energi untuk berdeformasi. Transformasi energi balistik menjadi energi untuk berdeformasi bertujuan untuk mengurangi energi yang diterima objek atau subjek yang dilindungi material tahan balistik. Energi yang diterima oleh objek atau subjek yang dilindungi kemudian diharapkan memiliki nilai tertentu yang relatif tidak membahayakan, apabila dibandingkan dengan energi balistik awal. Adapun energi-energi yang terdapat pada sistem pemodelan numerik penilitian ini adalah energi kinetik peluru, energi kinetik pelat, energi internal pelat, dan energi total pelat.

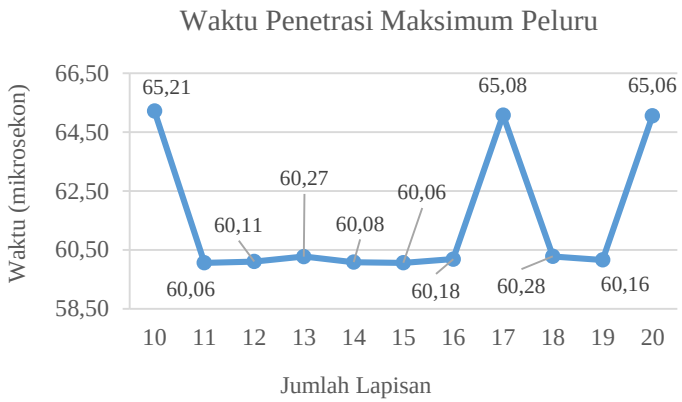
4.3.1. Energi Peluru

Peluru yang ditembakkan sesuai standar NIJ 0106.01 tipe IV memiliki nilai kecepatan sebesar 878 m/s. Berkesesuaian dengan kecepatan dan massanya, peluru memiliki energi kinetik sebesar 1579,4 J. Energi kinetik inilah yang harus diserap sebaik mungkin oleh pelat yang diuji. Sesuai dengan *boundary condition* yang telah dibahas pada bab sebelumnya, pada studi numerik ini, peluru langsung ditempelkan pada permukaan pelat. Hal ini dilakukan untuk membuat simulasi yang dijalankan lebih efisien terhadap waktu. Namun, *boundary condition* tersebut membuat kecepatan awal peluru sebagai kecepatan dimana peluru menumbuk pelat. Hal ini disebabkan peluru tidak mengalami gesekan dengan udara yang terdapat pada lingkungan. Namun, hal tersebut bukanlah menjadi masalah. Sebab, hal tersebut justru akan mensimulasikan keadaan terburuk dimana pelat ditembak dalam jarak yang sangat dekat. Kondisi tersebut adalah sebuah peningkatan standar dari jarak tembak yang tertera pada NIJ 0101.06. Adapun energi potensial pada peluru dapat diabaikan, disebabkan pengujian telah dibuat sedemikian rupa agar peluru tidak mengalami perubahan ketinggian.

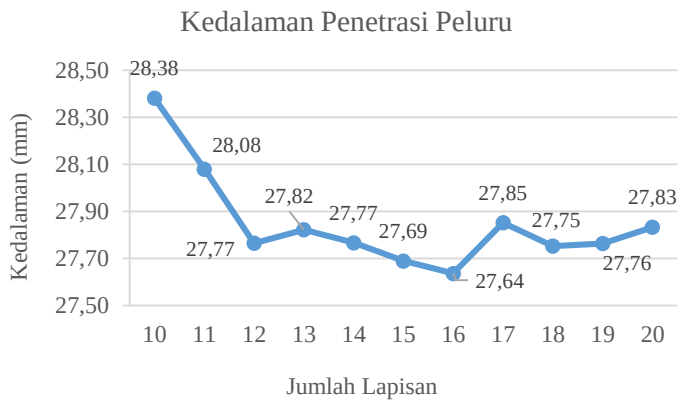


Gambar 4. 17. Grafik Energi Kinetik Peluru vs Waktu

Pada gambar 4.17, terlihat bahwa energi kinetik peluru yang ditembakkan kepada setiap variasi pelat terlihat mememiliki kurva yang berimpit antara satu dengan lainnya. Kurva-kurva tersebut dimulai pada titik awal energi kinetik peluru yang bernilai 1579,4 Joule. Kemudian, disebabkan tumbukan antara peluru dan pelat langsung terjadi pada detik nol, kurva-kurva tersebut perlahan menurun sampai akhirnya energi tersebut habis, sekitar 60-66 mikrodetik berikutnya. Turunnya energi peluru berhubungan langsung dengan penurunan kecepatan peluru akibat tumbukannya dengan pelat. Oleh karena itu, waktu dimana peluru kehilangan seluruh energinya tentunya bertepatan dengan waktu dimana peluru berhenti melakukan penetrasi dan alhasil mencapai kedalaman maksimum penetrasinya.



Gambar 4. 18. Grafik Waktu Penetrasi Maksimum Peluru



Gambar 4. 19. Grafik Kedalaman Penetrasi Peluru

Pada gambar 4.18, diketahui bahwa pada seluruh variasi pelat, peluru kehabisan energinya pada rentang waktu antara mikrodetik 60 sampai dengan mikrodetik 66 sejak terjadinya tumbukan. Pada grafik terlihat bahwa kurva tidak memiliki karakteristik tertentu, sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan jumlah lapisan pelat tidaklah mempengaruhi laju

penurunan kecepatan peluru. Hal ini kemungkinan disebabkan bahwa energi yang harus diserap oleh pelat untuk menghentikan laju peluru memiliki nominal yang relatif sama walaupun jumlah lapisan pada pelat diperbanyak. Sedangkan Pada gambar 4.19, diketahui bahwa pelat dengan jumlah lapisan sebanyak 10 dan 11 memiliki keunikan tersendiri dibandingkan variasi jumlah lapisan lainnya. Kedua variasi jumlah lapisan tersebut terpenetrasi melebihi kedalaman 28 mm dari permukaan dimana tumbukan terjadi. Hal ini sangat berbeda dibandingkan variasi jumlah lapisan lainnya yang hanya terpenetrasi melebihi kedalaman 27 mm saja. Hal ini kemungkinan disebabkan faktor ketebalan pelat yang dimiliki masing-masing kedua variasi jumlah lapisan tersebut. Secara visual pada simulasi, pelat dengan variasi jumlah lapisan sebanyak 10 dan 11 lapis memang telah terlihat berhasil ditembus oleh peluru, sehingga hal tersebut dapat menjelaskan mengapa kedalaman penetrasi pada kedua pelat melebihi variasi jumlah lapisan lainnya dengan cukup signifikan. Ini membuktikan bahwa melewati nilai jumlah lapisan tertentu, penambahan jumlah lapisan pada pelat tidak begitu mempengaruhi waktu dimana peluru berhenti, dan juga kedalaman penetrasi maksimum yang dapat dihasikan oleh peluru

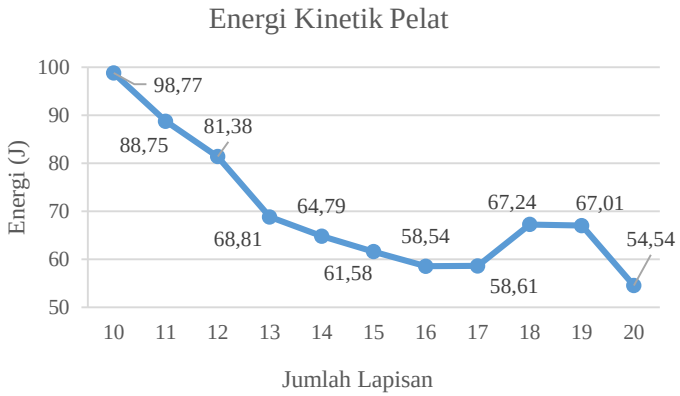
4.3.2. Energi pada Pelat

Pada awalnya energi pada pelat selalu berada pada nilai nol. Adapun segala perubahan yang terjadi setelah itu disebabkan terdapatnya penyerapan energi yang kemudian ditransformasikan menjadi suatu kerja, deformasi, kerusakan, dan/atau dilanjutkan kepada subjek atau objek dibelakang pelat. Pada pemodelan numerik ini, energi kinetik peluru akan ditransformasikan menjadi energi kinetik pelat, energi internal pelat, dan juga energi total pelat. Energi kinetik pelat merupakan energi yang digunakan oleh pelat untuk bergerak. Oleh sebab itu, apabila pelat tidak mengalami perpindahan relatif terhadap apapun, maka energi kinetik pelat bernilai nol. Energi internal pelat adalah energi yang digunakan oleh pelat untuk berdeformasi plastis dan elastis. Energi internal

juga dapat dijadikan sebuah parameter untuk mengetahui apabila terdapat kerusakan atau lubang pada pelat, khususnya apabila pelat mengalami penurunan energi internal yang cukup banyak, dimana hal tersebut terjadi dalam laju yang sangat cepat pula. Fenomena demikian dapat mengindikasikan terdapatnya *strain energy* yang dilepaskan kelingkungan, akibat bagian tertentu pada pelat sudah tidak dapat lagi menahan deformasi plastis yang terjadi akibat tumbukan dengan peluru. Energi internal pelat memiliki faktor energi kinetik pelat didalamnya, disebabkan energi kinetic pelat akan muncul apabila pelat dapat melakukan deformasi elastis. Energi total pelat memiliki faktor energi internal dan juga energi kinetik pelat didalamnya. Energi total pelat memperhitungkan segala jenis transformasi energi yang dapat terjadi pada pelat, dimana dua hal yang belum dipertimbangkan adalah energi kontak akibat gesekan sebagai efek tumbukan peluru dan pelat, dan juga energi termal yang muncul akibat perubahan temperatur pelat sebagai efek terdapatnya gesekan dan dan kerja internal pada pelat.

1. Energi Kinetik Pelat

   Energi kinetik yang dimiliki pelat merupakan sebuah bentuk transfer energi dari energi kinetik peluru. Energi kinetik merupakan energi yang digunakan oleh pelat untuk melakukan perpindahan relatif terhadap posisi awalnya. Namun, disebabkan seluruh sisi-sisi pelat telah dibuat sebagai *fixed support*, maka pelat hanya dapat bergerak relatif terhadap kondisi awalnya. Dengan kata lain, pergerakan yang terjadi adalah getaran. Pelat dapat bergetar akibat energi kinetik peluru yang diserap menjadi energi internal pelat, dan kemudian dilepaskan kembali ke lingkungan dalam bentuk deformasi elastis yang terus terjadi akibat kelenturan material pelat dan juga defleksi. Energi kinetik pada pelat ini akan berangsur turun menuju nilai nol apabila simulasi terus dijalankan sampai akhirnya didapatkan kondisi pelat yang sudah tidak lagi bergetar.



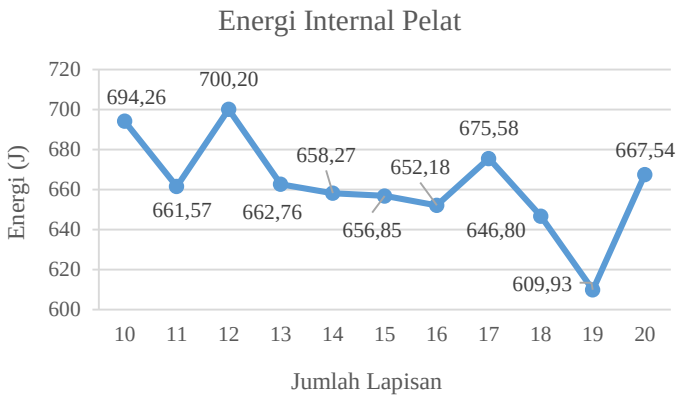
Gambar 4. 20. Grafik Energi Kinetik Pelat

Nilai energi kinetik pelat yang terdapat pada gambar 4.20 dievaluasi bertepatan dengan waktu dimana penetrasi maksimum terjadi pada setiap variasi jumlah lapisan. Hal ini dilakukan agar komparasi dan analisis dapat berdasarkan keadaan yang relatif sama antara satu variasi jumlah lapisan dengan yang lainnya. Pada gambar tersebut diketahui bahwa penambahan jumlah lapisan pelat menghasilkan trenline yang menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan jumlah lapisan secara umum akan menghasilkan pelat yang bersifat lebih kaku. Oleh karena itu, deformasi elastis membutuhkan lebih banyak energi untuk terjadi.

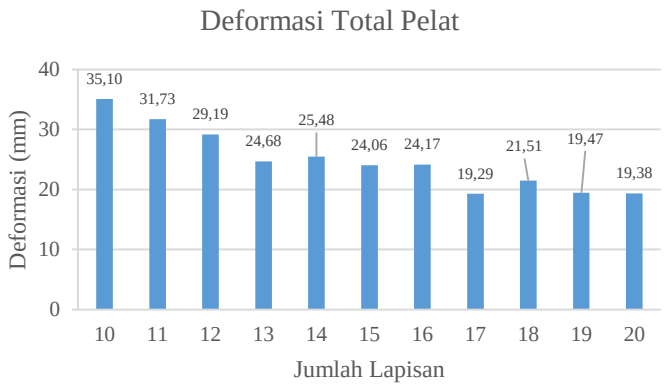
2. Energi Internal Pelat

Energi internal merupakan energi yang diterima atau diserap oleh pelat untuk berdeformasi akibat tumbukannya dengan peluru. Deformasi dapat terjadi secara elastis, plastis, maupun keduanya, tergantung waktu dimana deformasi tersebut dievaluasi. Adapun seluruh nilai energi yang terdapat pada gambar 4.21 dievaluasi bertepatan dengan waktu dimana peluru kehilangan energi kinetiknya dan mencapai kedalaman penetrasi maksimum. Diketahui dari gambar tersebut bahwa grafik memiliki trenline yang menurun. Hal ini

mengindikasikan bahwa energi kinetik peluru yang diserap pelat untuk berdeformasi semakin sedikit bersamaan dengan bertambahnya jumlah lapisan pelat. Namun indikasi ini tidak berarti apapun disebabkan nilai deformasi yang terjadi akibat energi internal pada setiap variasi jumlah lapisan belumlah diketahui.

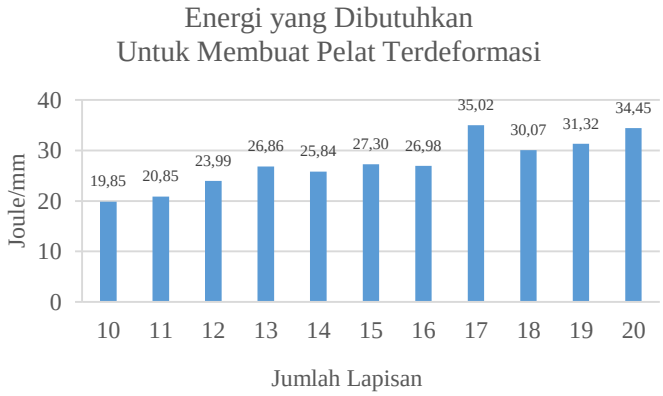


Gambar 4. 21. Grafik Energi Internal Pelat



Gambar 4. 22. Grafik Deformasi Total Pelat

Gambar 4.22 memperlihatkan nilai deformasi total yang dialami setiap variasi jumlah lapisan pada pelat. Adapun deformasi total adalah jumlah dari resultan vektor perpindahan yang dialami setiap elemen meshing pada tubuh pelat yang disimulasikan. Sedangkan gambar 4.19 memperlihatkan nilai energi yang diperlukan oleh faktor eksternal untuk menberikan deformasi sebesar satu milimeter ke setiap arah di setiap variasi jumlah lapisan pada pelat. Nilai-nilai pada grambar 4.21 dan 4.22 dievaluasi bertepatan dengan waktu dimana peluru kehilangan seluruh energi kinetiknya dan mencapai kedalaman penetrasi maksimum pada pelat. Sedangkan, nilai pada gambar 4.23 didapatkan dengan membagikan nilai energi internal dengan nilai deformasi pada setiap variasi jumlah lapisan pelat.



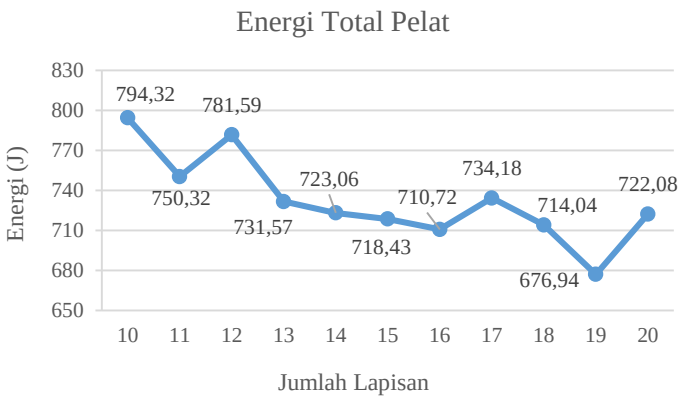
Gambar 4. 23. Grafik Energi/Deformasi

Dari kedua gambar tersebut, diketahui bahwa dengan bertambahnya jumlah lapisan pelat, maka nilai deformasi yang terjadi pada pelat semakin kecil, namun energi yang diperlukan untuk membuat pelat tersebut terdeformasi semakin besar. Hal ini pun sesuai dengan pembahasan pada energi kinetik pelat dimana semakin bertambahnya jumlah

lapisan maka pelat semakin sulit mengalami deformasi elastis. Namun disebabkan energi internal pun mendefinisikan nilai energi yang diserap untuk berdeformasi plastis juga, maka dapat disimpulkan bahwa dengan bertambahnya jumlah lapisan, pelat bersifat semakin kaku dan juga semakin tangguh.

Energi internal pelat secara umum sayangnya tidak dapat digunakan sebagai basis evaluasi untuk mengetahui seberapa besar energi yang hilang akibat rusaknya tiap lapisan pelat yang ditembus oleh peluru. Hal ini disebabkan untuk mengetahui energi yang hilang maka sebelumnya harus mengetahui seluruh energi yang terdapat didalam pelat. Adapun dua tipe energi yang belum dievaluasi adalah energi kontak dan energi termal, dimana keduanya baru dapat dievaluasi bersamaan dengan energi total. Kemudian, untuk mengetahui nilai energi yang hilang akibat terpeforasinya pelat maka energi total yang terdapat di setiap lapisan pada pelat haruslah dievaluasi satu persatu.

3. Energi Total Pelat



Gambar 4. 24. Grafik Energi Total Pelat vs Waktu

Energi total pelat adalah jumlah energi yang dimiliki pelat akibat tumbukan dengan peluru. Energi total selalu

memiliki kurva yang persis sama dengan kurva energi internal, hanya saja, sesuai dengan gambar 4.16, akan terdapat *offset* diantara kedua kurva. *Offset* ini disebabkan terdapatnya energi kontak yang diakibatkan gesekan antara pelat dengan peluru, dan energi termal yang diakibatkan naiknya temperature pelat akibat gesekan tersebut, maupun akibat kerja internal pelat. Energi kontak dan energi termal akan membuat kurva energi total berpisah secara perlahan dari energi internal, bersamaan dengan dimulainya tumbukan antara peluru dengan pelat. Sesuai dengan penjelasan tersebut, grafik pada gambar 4.24 memperlihatkan trenline yang menurun layaknya trenline grafik pada gambar 4.21 yang memperlihatkan kurva energi internal pada pelat.

Disebabkan energi total telah mempertimbangkan seluruh energi yang terdapat pada pelat, maka energi total sangat cocok digunakan sebagai basis untuk melakukan evaluasi yang lebih menyeluruh demi menyelidiki seberapa besar energi yang hilang akibat ditembusnya lapisan-lapisan pelat oleh peluru. Dari hasil evaluasi dan analisis tersebut, kemudian dapat disimpulkan variasi jumlah lapisan berapa saja yang terpeforasi.

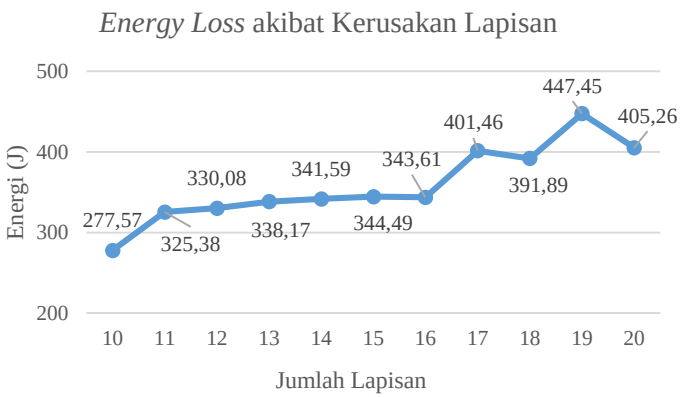
4.4. *Energy Loss*

Besar *energy loss* pada pelat dapat diketahui dengan mengevaluasi seberapa banyak lapisan-lapisan pada pelat yang memiliki indikasi kerusakan. Indikasi kerusakan ini pun dapat menjadi hal penentu yang dapat membedakan apabila peluru benar menembus terhadap keseluruhan lapisan pelat, atau apakah peluru berhasil ditahan oleh beberapa lapisan akhir pelat yang menyerap energi kinetik peluru dengan berdeformasi. Adapun layaknya yang sudah dibahas pada subbab 4.2, indikasi kerusakan dapat dilakukan secara subjektif menggunakan data visual tampak samping pelat untuk mengetahui apabila peluru berhasil menembus pelat. Namun analisis pun dapat dilakukan secara objektif dengan mengevaluasi apabila tiap lapisan pada pelat mengalami kerusakan akibat

penetrasi peluru dengan menghitung *energy loss* akibat *strain energy* yang dibebaskan ke lingkungan pada data energi total yang dimiliki setiap lapisan pelat yang dimaksud.

Tabel 4. 2. Penetrasi pada Pelat

No	Total Jumlah Lapisan	Lapisan yang Terpenetrasi	Lapisan yang Tidak Terpenetrasi	*Energy Loss* (J)
1	10	10	0	277,567
2	11	11	0	325,384
3	12	11	1	330,081
4	13	12	1	338,174
5	14	12	2	341,59
6	15	12	3	344,485
7	16	12	4	343,6147
8	17	13	4	401,4606
9	18	13	5	391,8878
10	19	13	6	447,4526
11	20	13	7	405,2644



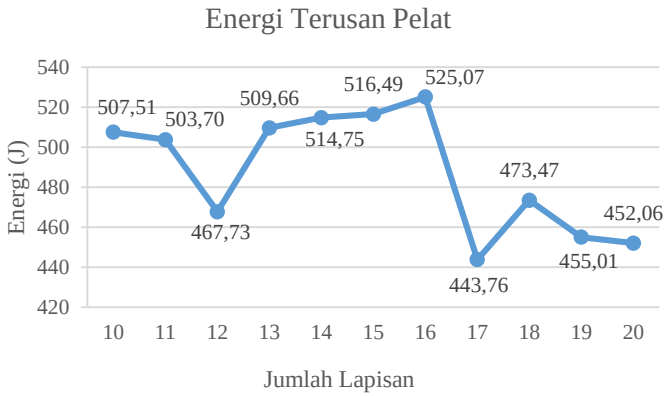
Gambar 4. 25. Grafik Energy Loss akibat Kerusakan Lapisan

Pada tabel 4.2, diketahui bahwa pelat 10 dan 11 lapis telah ditembus oleh peluru, disebabkan setiap lapisan pada masing-masing pelat diketahui mengalami kerusakan. Kemudian, penambahan jumlah lapisan pada pelat akan membuat energi yang hilang akibat terjadinya kerusakan tersebut semakin meningkat. Hal ini membuktikan bahwa walaupun peluru berhenti pada waktu dan kedalaman penetrasi yang relatif tidak begitu berbeda, energi yang dibutuhkan untuk melakukan penetrasi sebenarnya semakin besar apabila jumlah lapisan pelat diperbanyak. Ini pun membuktikan lebih lanjut bahwa pelat memiliki tingkat kekakuan dan ketangguhan yang semakin meningkat seiring dengan ditambahkannya jumlah lapisan. Bersamaan dengan nilai deformasi total pada pelat, nilai energi yang hilang ini diharapkan dapat membantu menjelaskan mengapa energi internal dan energi total pelat malah semakin menurun bersamaan ditambahkannya jumlah lapisan. Sebagai suatu contoh, terlihat pada gambar 4.25 bahwa terdapat 277,57 Joule energi yang hilang pada pelat 10 lapis. Kemudian, merujuk gambar 4.24 serta 4.22 yang memperlihatkan nilai energi total pelat terkait sebesar 794,320 Joule, dan nilai deformasi total sebesar 35,095 mm, keduanya merupakan nilai tertinggi dibandingkan variasi jumlah lapisan pelat lainnya, maka dapat ditarik suatu kesimpulan. Bahwa dalam proses menghentikan laju peluru, pelat 10 lapis harus mengkompensasikan kerja internalnya kepada deformasi plastis. Ini disebabkan pelat 10 lapis tidak memiliki kekakuan dan ketangguhan yang cukup untuk dapat menyerap atau mendisipasikan energi peluru secara efektif, khususnya apabila dibandingkan dengan pelat yang memiliki jumlah lapisan lebih banyak. Oleh karena itu, lapisan-lapisan pada pelat 10 lapis dapat dipenetrasi peluru dengan menggunakan sejumlah energi yang relatif rendah, dan sisa penampang lapisan-lapisan pelat sisanya yang tidak terpenetrasi haruslah menyerap energi kinetik peluru yang tersisa dengan melakukan deformasi yang lebih besar agar laju peluru dapat dihentikan.

4.5. Energi Terusan

Tabel 4. 3. Energi yang Diteruskan Pelat

No	Jumlah Lapisan	Energi Peluru (J)	Energi yang Teralihkan (J)	Energi yang Diteruskan (J)
1	10	1579,4	1071,887	507,513
2	11		1075,704	503,696
3	12		1111,671	467,729
4	13		1069,744	509,656
5	14		1064,650	514,750
6	15		1062,915	516,485
7	16		1054,335	525,065
8	17		1135,641	443,759
9	18		1105,928	473,472
10	19		1124,393	455,007
11	20		1127,344	452,056



Gambar 4. 26. Grafik Energi Terusan

Apabila energi total pada keseluruhan pelat serta *energy loss* akibat kerusakan pada setiap lapisan-lapisan pelat telah diketahui, maka dapat diketahui seberapa besar energi yang

diteruskan pelat kepada objek atau subjek yang dilindunginya. Menggunakan prinsip konservasi energi yang menyatakan energi awal peluru harus sesuai dengan nilai kumulatif energi akhir pada pelat, maka nilai perubahan yang didapatkan adalah nilai energi yang diteruskan pelat kepada objek atau subjek dibelakangnya. Berdasarkan tabel 4.3, diketahui bahwa seluruh variasi pelat berhasil mengalihkan lebih dari 1000 Joule energi kinetik peluru. Adapun fluktuasi pada nilai energi yang dialihkan tersebut memiliki keterkaitan langsung dengan seberapa besar kerusakan dan deformasi yang terjadi pada pelat. Sebagai contoh, variasi pelat dengan jumlah lapisan 10 sampai dengan 12 lapis diketahui dapat mengalihkan energi yang lebih besar dibandingkan variasi jumlah lapisan 13 sampai dengan 16. Hal ini disebabkan pelat 10 sampai dengan 12 lapis mengalami banyak kerusakan dan juga deformasi sebagai kompensasi kekakuan dan ketangguhan yang lebih buruk dibandingkan variasi jumlah lapisan yang lebih banyak. Hal inilah yang menyebabkan energi yang dialihkan oleh kedua pelat bernilai lebih tinggi dibandingkan variasi jumlah lapisan yang lebih banyak.

Namun, penting untuk diingat bahwa pelat 10 dan 11 lapis berhasil ditembus peluru. Sehingga, walau energi yang dialihkan oleh keduanya memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan beberapa variasi jumlah lapisan pada pelat-pelat lainnya. Kemudian, penting untuk diketahui pula bahwa nilai-nilai pada tabel 4.3 dievaluasi dengan asumsi bahwa bagian tubuh objek atau subjek yang dilindungi tidaklah memiliki kontak antara permukaan belakang pelat. Sehingga, apabila pelat terpeforasi sekalipun, pelat tetap memiliki keleluasaan untuk terus melaksanakan kerja dalam menghentikan laju peluru, tanpa sebagian energi kinetiknya ditransmisikan kepada tubuh objek atau subjek yang dilindungi. Apabila kedua pelat tersebut diaplikasikan sebagai *body armor*, tentunya penggunanya telah terluka parah. Hal ini disebabkan tepat pada waktu peluru berhasil melakukan merusak lapisan terakhir pada kedua pelat, tentunya peluru masih memiliki sejumlah energi

kinetik disebabkan berdasarkan tabel 4.1 peluru sebenarnya belum mencapai kedalaman maksimum penetrasinya.

Sejumlah energi kinetik ini pada kenyataannya langsung diterima oleh tubuh pengguna, walau tentu sebagian kecil energi kinetik tersebut juga akan diserap oleh kedua pelat untuk berdeformasi lebih lanjut. Walau begitu, penyerapan energi kinetik peluru secara langsung oleh tubuh manusia tentunya membuat pengguna terluka parah, sehingga pelat telah gagal melaksanakan fungsinya sebagai material pelindung. Pada gambar 4.22, diketahui bahwa penambahan jumlah lapisan berhasil menurunkan nilai energi yang diteruskan kepada objek atau subjek yang terdapat dibelakang pelat.

4.6. Kinerja Pelat

Salah satu faktor penentu yang dapat menilai kinerja material tahan balistik tipe IV adalah seberapa besar energi yang bisa dialihkan per satuan massa komponen material pelindung yang digunakan. Material pelindung diharapkan dapat menerima dan mengalihkan energi balistik proyektil sebanyak mungkin, namun memiliki massa yang relatif tidak begitu berat. Hal ini disebabkan penggunaan material pelindung tahan balistik selalu berkaitan dengan keadaan dengan intensitas dan mobilitas tinggi. Sehingga, pengguna akan selalu diuntungkan apabila material pelindung yang digunakan memiliki efektifitas perlindungan yang tinggi dalam massa yang ringan.

Tabel 4. 4. Massa setiap Variasi Pelat

Jumlah Lapisan	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Massa (kg)	2,12	2,33	2,54	2,75	2,96	3,17	3,38	3,60	3,81	4,02	4,23

Gambar 4. 27. Kerja Spesifik Pelat

Pada gambar 4.27, diketahui bahwa pelat 12 lapis merupakan pelat yang paling efektif dalam melaksanakan kerjanya sebagai material tahan balistik tipe IV. Adapun pelat 10 dan 11 lapis tidaklah dievaluasi disebabkan keduanya memiliki lubang akibat penetrasi peluru. Kurva pada gambar 4.27 terlihat memiliki trenline menurun seiring dengan bertambahnya jumlah lapisan pelat. Hal ini disebabkan penambahan massa seiring dengan ditambahkannya jumlah lapisan pelat tidaklah memberikan keunggulan penyerapan energi yang cukup signifikan. Namun, penting untuk diketahui bahwa deformasi pada pelat dengan jumlah lapisan yang semakin banyak justru semakin sedikit. Hal ini dapat menjadi suatu basis argumen dimana pelat dengan jumlah lapisan yang banyak akan memiliki efektifitas yang jauh lebih tinggi apabila proyektil yang menumbuk pelat tersebut berjumlah lebih dari satu. Hal ini disebabkan pelat-pelat tersebut kemudian memiliki kesempatan untuk menyerap dan mengalihkan energi tambahan dari proyektil berikutnya yang akan menumbuk, dimana kemungkinan pelat dengan jumlah lapisan yang relatif lebih sedikit akan gagal dalam melaksanakan kerjanya, disebabkan deformasi plastis yang terjadi pada pelat-pelat tersebut kemungkinan besar sudah mendekati strain limit material.

Melihat pembahasan pada subbab sebelumnya, agar pelat memiliki efektifitas yang tinggi dalam menyerap energi balistik peluru, penting bagi pelat untuk ditembus oleh peluru sampai dengan lapisan tertentu. Kemudian penting pula bagi pelat agar lapisan-lapisan yang tersisa menerima pembebaban sedemikian rupa, agar tegangan yang diterima lapisan-lapisan tersebut melewati tegangan *yield* material, sehingga deformasi yang terjadi adalah deformasi plastis. Hal ini bertujuan untuk memperkecil kemungkinan terjadinya deformasi elastis, disebabkan energi kinetik peluru yang ditransformasikan menjadi energi untuk berdefleksi akibat deforasi plastis akan berubah menjadi energi kinetik pelat. Dan dibandingkan energi internal yang digunakan untuk berdeformasi plastis, energi kinetik pelat memiliki nilai yang sangat kecil. Dan energi kinetik pelat tersebut pun suatu saat akan kembali ke nilai nol, disebabkan pelat tidak lagi melakukan perpindahan atau bergetar. Sehingga, deformasi elastis sama sekali tidak memberikan kontribusi nyata terhadap proses penyerapan energi balistik peluru secara keseluruhan. Sehingga, sifat mekanik ketangguhan material dapat dinyatakan memiliki peran lebih penting dibandingkan kekakuan untuk menghasilkan material tahan balistik tipe IV yang baik.

Berdasarkan pembahasan pada subbab 4.2, diketahui bahwa apabila material komposit lamina epoksi-rami *woven* digunakan serta dalam konteks penumbukan satu peluru, penambahan 3 lapisan dari pelat 10 lapis memberikan performa terbaik. Hal ini disebabkan nilai BFS pelat 13 lapis telah memenuhi standar NIJ 0101.06, dan tegangan terbesar pada lapisan terakhir pelat tersebut baru saja melewati tegangan *yield* material. Sehingga, dapat dikonfirmasi bahwa lapisan terakhir pada pelat pun telah melakukan sejumlah deformasi plastis, dan meningkatkan efektifitas penyerapan energi pelat secara keseluruhan. Kemudian, disebabkan nilai tegangan tersebut yang baru saja melewati nilai tegangan *yield* material, pelat 13 lapis pun tidaklah berada dalam bahaya terjadinya kegagalan, Adapun pelat 17 lapis merupakan alternatif yang baik disebabkan energi

terusannya yang memiliki nilai terkecil dibanding variasi pelat lainnya, namun dengan nilai kerja efektif yang tidak begitu tinggi. Mengenai kerja efektif pelat yang semakin menurun seiring dengan ditambahkannya jumlah lapisan pada pelat, hal ini disebabkan efek penyerapan energi tidaklah memiliki peningkatan yang cukup signifikan relatif terhadap bertambahnya massa pelat akibat jumlah lapisan yang semakin meningkat. Oleh karena itu, penting adanya untuk menemukan keseimbangan antara penambahan jumlah lapisan pada pelat, dengan kemampuan penyerapan energi pelat tersebut

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penilitian yang dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Bahwa pelat epoksi-rami *woven* dengan jumlah lapisan sebanyak 10 dan 11 lapis telah berhasil ditembus peluru, dan pelat dengan jumlah lapisan sebanyak 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, dan 20 tidak berhasil ditembus peluru. Secara berurutan dimulai dari jumlah lapisan paling sedikit, nilai *backface signature* pada pelat yang tidak berhasil ditembus peluru adalah sebesar 5,42 mm, 2,47 mm, 1,6 mm, 1,33 mm, 1,08 mm, 0,92 mm, 0,76 mm, 0,6597 mm, dan 0,6577 mm. Pelat dengan jumlah lapisan sebanyak 10 dan 11 lapis maka dapat dinyatakan tidak memenuhi standar penetrasi NIJ 0101.06 tipe IV disebabkan keduanya telah berhasil ditembus peluru. Pelat dengan jumlah lapisan sebanyak 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, dan 20 maka dapat dinyatakan telah memenuhi standar penetrasi dan *backface signature* sesuai dengan NIJ 0101.06 tipe IV, disebabkan seluruh variasi pelat tersebut tidak berhasil ditembus peluru, dan nilai backface signature pada pelat berada dibawah batas maksimum yang diizinkan, yaitu sebesar 44 mm.
2. Konfigurasi pelat paling optimal dalam batasan penelitian ini adalah pelat dengan jumlah lapisan sebanyak 13 lapis. Adapun alasannya adalah sebagai berikut:
   - Pelat 13 lapis telah memenuhi standar penetrasi dan *backface signature* sesuai NIJ 0101.06 tipe IV
   - Seluruh lapisan yang tidak terpenetrasi oleh peluru pada pelat 13 lapis mengalami deformasi plastis, sehingga seluruh lapisan berperan aktif dalam menyerap atau mengalihkan energi kinetik peluru.
   - Pelat tidak dalam kondisi yang mendekati kegagalan.

- Dengan nilai 389,07 Joule/kg, pelat 13 lapis memiliki nilai kerja spsifik terbesar kedua terhadap seluruh variasi pelat yang diteliti. Adapun nilai kerja spesifik terbesar dimiliki oleh pelat 12 lapis dengan nilai 438,01 Joule, namun disebabkan pelat 12 lapis berada pada ambang batas kegagalan, maka pelat 12 lapis tidak dapat dinyatakan sebagai pelat dengan konfigurasi optimal.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian berikutnya adalah:

1. Dilakukan pengujian eksperimen sebagai suatu pembanding terhadap hasil studi numerik yang dilakukan pada penelitian ini
2. Digunakannya variasi material yang berbeda pada lapisan-lapisan tertentu untuk membuat pelat komposit lamina yang memiliki efektifitas penyerapan atau pengalihan energi yang tinggi
3. Dilakukannya perhitungan secara teoritis menggunakan rumus-rumus terkait sebagai upaya untuk mengonfirmasi tingkat ketepatan pemodelan numerik yang telah dilakukan pada penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

[1] Suryaneta. 2007. Kinerja Serat Rami sebagai *Reinforcement* pada Polimer Komposit Panel Anti Peluru. Universitas Indonesia.

[2] Fisika.lipi.go.id, “Baju Tahan Peluru dari Serat Rami”, 2009, 21:12 [diakses 28 Mei 2020]. Tersedia dari http://www.fisika.lipi.go.id/webfisika/content/baju-tahan-peluru-dari-serat-rami

[3] Mujiyono, Didik Nurhadiyanto, Alaya Fadlu Hadi Mukhammad. 2016. Rekayasa Panel Tahan Peluru Level IV Standar NIJ dari Komposit Serat Rami dan Hardfacing Material HV1000 dengan Matriks Epoxy. Universitas Negeri Surakarta.

[4] Fábio de Oliveira Braga Fábio de Oliveira, Thiago Lara Milanezia, Sergio Neves Monteiroa, Luis Henrique Leme Louroa, Alaelson Vieira Gomesa, Édio Pereira Lima Jr. 2017. Ballistic Comparison between Epoxy-Ramie and Epoxy-Aramid Composites in Multilayered Armor Systems. Department of Materials Science Military Institute of Engineering. Rio de Janeiro. Brazil

[5] Roy T, Chakraborty D. 2006. Delamination in Hybrid FRP Laminates under Low Velocity Impact. Department of Mechanical Engineering. Indian Institute of Technology Guwahati. Assam. India

[6] Naik NK, Shirirao P, Reddy BCK, Ballistic Behaviour of Woven Fabric Composites: formulation. International Journal of Impact Engineering 2006;32(9):1521-2

[7] Susetya, Ananta Jatra. 2018. Analysis of Composite Epoxy-HGM-Woven Ramie Fiber as Bulletproof Panel of Assault Rifle. Teknik Mesin

[8] Soemardi TP, Kusumaningsih W, Irawan AP. 2009. Karakteristik Mekanik Komposit Lamina Serat Rami Epokso Sebagai Bahan Alternatif Soket Prostesis

[9] Soemardi TP, Kusumaningsih W, Irawan AP. 2011. Tensile and Flexural Strength of Ramie Fiber Reinforced Epoxy Composites for Socket Prosthesis Application.

[10] National Institute of justice (NIJ). 2008. *NIJ 0101.06*. Washington, D.C. United States

[11] Rizki Aditya. 2013. Sifat Mekanik Biokomposit Serat Rami. Institut Pertanian Bogor.

[12] Annan, Kofi. 2000. Freedom from Fear: Small Ams. Report of the Secretary-General to the Millenium Assembly of the United Nations. New York. United States

[13] GBD 2016 Injury Collaborators. Global Mortality From Firearms, 1990-2016. JAMA. 28 Aug 2018; 320(8):792-814. doi:10.1001/jama.2018.10060.

[14] Compositesmanufacturingmagazine.com (oleh American Composite Manufacturers Association), "A Call to Arms", 2017, 21:30 (diakses 6 Juni 2020). Tersedia dari http://compositesmanufacturingmagazine.com/2017/01/ballistic-composite-materials-meet-demands-save-lives/

[15] Boucher, Julien. Friot, Damien. IUCN, 2017. Primary Microplastic in the Oceans: A Global Evaluation of Sources.

BIODATA PENULIS

Rayhan Fikriandry Rizal merupakan anak bungsu dari dua bersaudara pasangan Rizal dan Anne Triany. Penulis lahir di Bandung, tanggal 17 Oktober tahun 1995. Penulis menempuh pendidikan formal sekolah dasar pada tahun 2001 sampai 2004 di SD Unggulan Islamic Village Tangerang, dan dilanjutkan dari tahun 2004 hingga 2007 di SD BPI Bandung. Penulis kemudian melanjutkan pendidikannya di SMPN 28 Banding pada tahun 2007 hingga 2010, dan di SMAN 20 Bandung pada tahun 2010 hingga 2013. Setelah menyelesaikan pendidikan formal, penulis memutuskan untuk menempuh pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Departemen Teknik Mesin. Selama berkuliah, penulis mengikuti berbagai kegiatan akademik dan non akademik demi menunjang terbentuknya pengalaman moral, keprofesian, serta sosial yang kaya. Penulis aktif berkontribusi sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Mesin periode 2014/2015 dan 2015/2016 masing-masing sebagai Staf dan Sekretaris Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa. Setelah mengabdi kepada Himpunan Mahasiswa Mesin, pada tahun 2016 penulis kemudian mendapatkan amanah untuk menjadi Koordinator Steering Committee POROS 2016. Jejak keaktifan penulis pada bidang kemahasiswa diakhiri pada tahun 2018, dimana penulis menjadi anggota Dewan Presidium Mesin sebagai PLT Divisi Kontrol Himpunan. Penulis pun aktif sebagai rakyat Laboratorium Metalurgi, sebagai Asisten Praktikum Metalurgi 1 dan 2, serta sebagai Grader mata kuliah Metalurgi 2. Informasi lebih lanjut mengenai penelitian ini dapat menghubungi penulis melalui email rayhanfikriandry@gmail.com.