

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perlindungan terhadap tentara dan kendaraan militer dari hantaman proyektil berkecepatan tinggi yang ditembakkan menggunakan senjata submesin dan senapan mesin ringan menjadi faktor krusial dalam pertempuran modern (Siengchin dkk, 2023). Material logam secara umum banyak diaplikasikan dikarenakan sifat ketangguhan dan kekuatannya. Namun, material logam konvensional tidak diperuntukkan untuk pergerakan tinggi dan proteksi yang cukup bagus (Kosedag dkk, 2022).

Dalam upaya meningkatkan performa pelindung balistik, material komposit berbasis aluminium telah menjadi topik penelitian yang berkembang pesat. *Aluminium Matrix Composite* (AMC) menawarkan karakteristik unggul berupa kekuatan mekanik yang tinggi, densitas rendah, dan ketahanan terhadap korosi (Kannan dkk, 2023), menjadikannya kandidat ideal untuk aplikasi pelindung balistik. Selain itu, AMC memiliki kemampuan untuk disesuaikan dengan berbagai jenis penguat, yang dapat meningkatkan sifat mekaniknya secara signifikan.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Kumar, S. S., 2023, dilakukan studi komparatif mengenai perilaku balistik material aL6061 yang diproses menggunakan metode *friction stir processing* (FSP) dengan penambahan *Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT) dan *graphene* (g). Hasil penelitian menunjukkan bahwa target Al6061-MWCNT mengalami penurunan kedalaman penetrasi sebesar 37,81% dibandingkan dengan material dasar (*base metal*), menandakan peningkatan performa balistik yang signifikan. Selain itu, mikrokekerasan material meningkat sekitar 60,3%, yang memperkuat ketahanan material terhadap dampak balistik.

Chernyshov dkk, 2019 melakukan penelitian komposit matriks aluminium yang diperkuat dengan Al_2O_3 secara signifikan meningkatkan perlindungan balistik dengan menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap penetrasi peluru. Uji eksperimental menggunakan peluru PAB-9 membuktikan efektivitasnya, di mana

material ini mampu memberikan performa lebih baik dibandingkan paduan aluminium konvensional serta tidak mengalami kerusakan seperti material keramik.

Penelitian ini memfokuskan pada penguatan AMC menggunakan dua material yang berbeda, yaitu *Carbon Nanotube* (CNT), dan *Aluminium Oxide* (Al_2O_3), dengan metode fabrikasi *stir squeezed casting*. Pemilihan kedua penguat ini bertujuan untuk mengeksplorasi sifat mekanik dan balistik yang unggul serta menurunkan biaya produksi secara signifikan. Dengan membandingkan kedua material penguat ini, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kombinasi terbaik dalam menciptakan material yang ringan namun memiliki ketahanan tinggi untuk aplikasi pelindung balistik.

Penguat dalam AMC memiliki pengaruh signifikan terhadap performa uji balistik, terutama dalam meningkatkan ketahanan material terhadap tumbukan proyektil. Berbagai jenis dan fraksi volume penguat dapat memengaruhi sifat mekanik AMC, seperti kekuatan, ketangguhan, serta ketahanan terhadap deformasi. Oleh karena itu, penulis tertarik untuk melakukan penelitian sifat mekanik AMC dengan variasi penguat untuk menjadi data analisis numerik uji balistik, sehingga hasil penelitian ini dapat memberikan wawasan lebih dalam mengenai optimalisasi material untuk aplikasi perlindungan balistik. Metode fabrikasi yang digunakan adalah *stir squeezed casting*. Metode ini menjanjikan hasil yang baik karena kemampuannya dalam mencapai distribusi yang seragam dari material penguat serta meningkatkan integritas material (Natrayan dkk, 2018).

Selain itu, dalam penelitian ini juga akan melakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS untuk menganalisis perilaku material saat terjadi impact dengan proyektil peluru. Simulasi ini penting untuk memprediksi kinerja material sebelum dilakukan pengujian fisik, sehingga dapat menghemat waktu dan biaya penelitian. Data yang diperoleh dari simulasi akan dibandingkan dengan hasil uji mekanik aktual, seperti uji impact, uji tarik, dan karakterisasi morfologi menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM).

Penelitian ini akan difokuskan pada penggunaan fraksi berat penguat sebesar 1%wt yang didapatkan dari data penelitian sebelumnya untuk masing-masing jenis penguat. Dengan konsentrasi ini, diharapkan dapat dicapai keseimbangan optimal antara kekuatan mekanik dan densitas material. Proses fabrikasi akan dilakukan

dengan hati-hati untuk memastikan kualitas material yang dihasilkan, dan semua spesimen akan diuji secara sistematis untuk mengevaluasi kinerja mereka di bawah berbagai kondisi beban.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh CNT, dan Al_2O_3 dengan rasio 1%wt terhadap sifat mekanik Aluminium Matrix Composite (AMC) yang dihasilkan melalui metode *stir squeeze casting*?
2. Bagaimana karakteristik struktur AMC yang diperkuat dengan partikel CNT dan Al_2O_3 menggunakan metode fabrikasi *stir squeeze casting*?
3. Bagaimana kesinambungan antara hasil uji tarik dan uji impak terhadap peringkat kinerja balistik dari dua jenis *Aluminium Matrix Composite* (AMC) yang diperoleh melalui simulasi?
4. Bagaimana performa balistik AMC jika diuji dengan standar NIJ kelas RF1 melalui studi secara numerikal?

1.3. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis sifat mekanik AMC yang diperkuat dengan CNT dan Al_2O_3 dengan rasio 1%wt menggunakan metode *stir squeezed casting*
2. Menganalisis struktur mikro AMC yang diperkuat dengan CNT dan Al_2O_3 rasio 1%wt dengan metode fabrikasi *stir squeezed casting*.
3. Menganalisis hubungan antara hasil uji tarik terhadap peringkat kinerja balistik dari dua jenis AMC berdasarkan simulasi ANSYS, sehingga dapat menentukan material dengan ketahanan terbaik terhadap impak balistik.
4. Melakukan optimasi kinerja balistik AMC dengan standar NIJ kelas RF1 melalui simulasi ANSYS.

1.4. Batasan Penelitian

Dalam menyelesaikan masalah yang disebutkan dalam subbab 1.2., digunakan beberapa batasan masalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini difokuskan pada penggunaan dua jenis penguat: CNT dan Al_2O_3 , masing-masing dengan fraksi berat 1%wt.
2. Proses fabrikasi menggunakan metode *stir squeezed casting* dengan kecepatan putaran 500 rpm, durasi pengadukan 5 menit, tekanan 30 MPa.
3. Uji mekanik yang dilakukan meliputi uji impact, uji tarik, dan karakterisasi morfologi menggunakan SEM.
4. Simulasi dilakukan dengan perangkat lunak ANSYS menggunakan model material yang sesuai.

1.5. Sistematika Penelitian

1. Pendahuluan: Menguraikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, dan batasan masalah.
2. Tinjauan Pustaka: Membahas studi literatur terkait AMC, material penguat, metode fabrikasi, dan teknik pengujian.
3. Metodologi Penelitian: Menjelaskan langkah-langkah penelitian, mulai dari fabrikasi, pengujian secara mekanikal, hingga studi secara numerikal.
4. Hasil dan Pembahasan: Menganalisis hasil uji mekanik dan simulasi.
5. Kesimpulan dan Saran: Menyimpulkan temuan penelitian dan memberikan rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

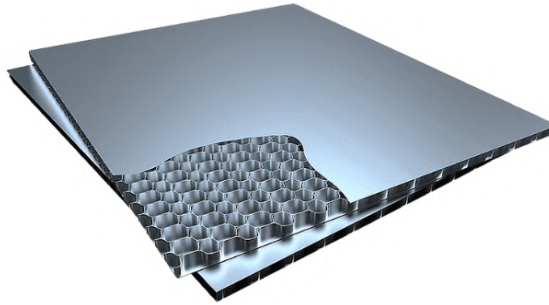
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Material Komposit

Material komposit dirancang dengan menggabungkan dua atau lebih material yang berbeda untuk memperoleh sifat yang lebih unggul dibandingkan dengan komponen individualnya. Material ini semakin penting dalam berbagai industri karena kombinasi unik antara ringan, daya tahan, dan performa tinggi. Aspek utama dari material komposit mencakup komposisi, teknik manufaktur, dan sifat-sifat kuncinya, yang berperan penting dalam penerapannya di berbagai bidang, mulai dari industri dirgantara hingga rekayasa biomedis. Bagian berikut akan membahas aspek-aspek fundamental tersebut secara lebih mendalam.

Menurut Singh dkk, 2024 material komposit dirancang dengan menggabungkan dua atau lebih material yang berbeda untuk memperoleh sifat yang lebih unggul dibandingkan dengan komponen individualnya. Material ini semakin penting dalam berbagai industri karena kombinasi unik antara ringan, daya tahan, dan performa tinggi. Pemahaman mengenai interaksi antara material matriks dan elemen penguat menjadi aspek krusial dalam pengembangan material komposit, karena hal ini memungkinkan penyesuaian sifat material agar sesuai dengan kebutuhan spesifik di berbagai aplikasi industri. Sifat utama yang menjadikan material komposit unggul meliputi rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, serta fleksibilitas dalam desain. Karakteristik ini menjadikan material komposit lebih disukai dibandingkan material konvensional dalam berbagai aplikasi, terutama di bidang yang membutuhkan inovasi tinggi dalam rekayasa dan desain, seperti industri dirgantara dan rekayasa biomedis.

Sementara menurut Lazović dkk, 2024 material komposit telah mengalami perkembangan pesat selama satu abad terakhir, dengan evolusi yang mencakup jenis, sifat, teknologi, dan aplikasinya, sehingga meningkatkan permintaan akan praktik standar dalam industri. Seiring dengan kemajuan ini, kebutuhan akan standarisasi menjadi semakin penting untuk memastikan kualitas dan keandalan



Gambar 2.1 Salah satu contoh material komposit

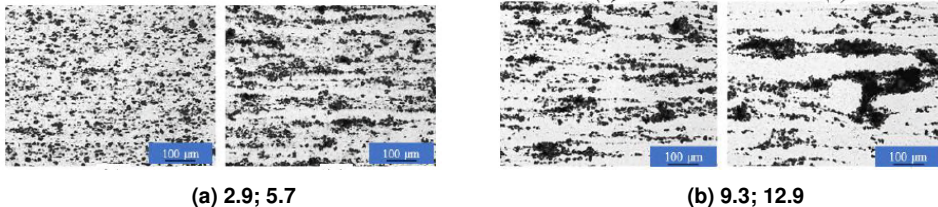
material komposit di berbagai aplikasi. Analisis terhadap standar yang diterbitkan oleh *International Organisation for Standardization* (ISO) dan *American Society for Testing and Materials* (ASTM) menunjukkan bahwa kedua organisasi tersebut telah menetapkan sekitar seratus standar yang mencakup terminologi, sifat material, serta metode pengujian. Hal ini mencerminkan pendekatan yang terstruktur dalam upaya standarisasi material komposit guna mendukung inovasi dan penerapan yang lebih luas di berbagai industri.

2.2. Komposit Matriks Aluminium

Paduan aluminium telah lama menjadi unsur penting bagi industri otomotif, penerbangan, kelautan, dan industri lainnya berkat rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, biaya produksi yang cukup ekonomis, serta ketahanan korosi yang baik. Meskipun demikian, paduan aluminium konvensional cenderung mempunyai sifat mekanik yang lemah akibat panas, ketidakstabilan struktur mikro, serta rendahnya ketahanan terhadap *creep* (Qu dkk, 2024).

Aluminium matrix composite (AMC) merupakan salah satu material yang memiliki potensi besar karena kombinasi sifat-sifatnya yang baik, seperti kekuatan yang tinggi, densitas yang rendah, daya tahan yang baik, ketahanan yang baik terhadap korosi (Kannan dkk, 2023), ketersediaan bahan baku yang berlimpah dan harga yang bersaing dengan material lain. Selanjutnya pada aplikasi AMC telah banyak berkembang di bidang otomotif, pertambangan, penerbangan, pertahanan dan lain sebagainya. Material AMC pada beberapa komponen pengaplikasiannya

mampu bekerja pada tegangan tinggi, contohnya seperti di bidang otomotif yaitu sebagai komponen drive shaft dan piston, bidang penerbangan yaitu sebagai baling-baling helikopter dan bidang pertahanan yaitu sebagai *track shoes* dari tank.



(a) 2.9; 5.7

(b) 9.3; 12.9

Gambar 2.2 Distribusi penguat dengan beragam rasio ukuran butir (Slipenyuk dkk, 2004)

Konsep dasar dari komposit matriks aluminium (AMC) biner dan hibrida adalah meningkatkan kinerja aluminium dan paduannya melalui penambahan material penguat berupa partikel atau serat. Material penguat ini dicampurkan ke dalam matriks aluminium dengan variasi persentase massa (wt%) menggunakan berbagai metode pemrosesan dan fabrikasi (Abishkenov dkk, 2025). Komposit matriks logam merupakan generasi baru dalam rekayasa material, di mana penguat berbahan keramik dapat terintegrasi dengan baik di dalam matriks logam. Pada kasus aluminium, paduan matriks ini menghasilkan kombinasi sifat-sifat unggul dari aluminium dan material penguat keramik, seperti kekuatan dan modulus yang tinggi (Kok, 2005).

Jika dibandingkan dengan material tanpa penguat, berikut ini adalah keuntungan AMC (Kar, A. dkk, 2024):

1. Kekuatan yang meningkat;
2. Menambah kekakuan;
3. Mengurangi densitas (berat);
4. Sifat mekanik yang lebih unggul pada suhu tinggi;
5. Koefisien muai termal yang dapat dikendalikan;
6. Manajemen termal dan panas yang lebih baik;
7. Karakteristik listrik yang lebih unggul dan dapat disesuaikan;
8. Ketahanan terhadap abrasi dan keausan yang lebih tinggi;
9. Kontrol massa yang lebih optimal (terutama dalam aplikasi dengan gerakan bolak-balik)

10. Meredaman getaran yang lebih baik

Untuk pemahaman yang lebih baik, jika beberapa keuntungan tersebut kita jabarkan dalam bentuk angka. Sebagai contoh, jika menambahkan 60 vol.% serat alumina ke aluminium murni maka akan mengakibatkan koefisien ekspansi berkurang dari 24 ppm °C ke 7 ppm °C. (Kar, A. dkk, 2024)

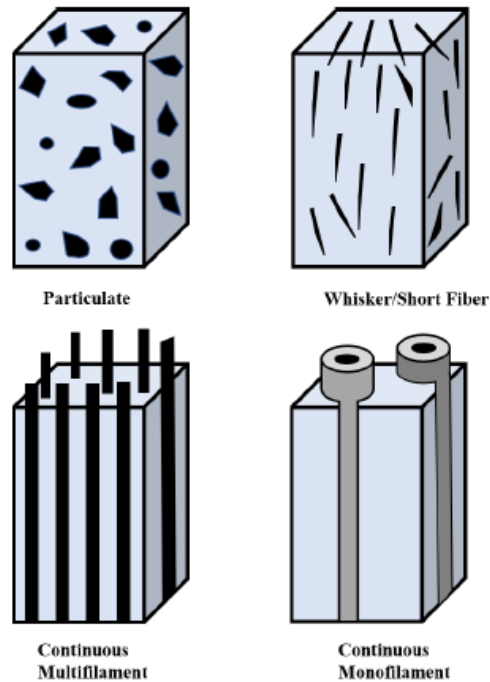
Berdasarkan sifat material yang unik ini, AMC mulai dilirik dalam dunia peperangan, khususnya dalam segi pertahanan. Beberapa bagian pada kendaraan *Light Armored Vehicle* (LAV) sudah menggunakan *Metal Matrix Composite* (MMC, termasuk AMC), seperti lambung kendaraan, plat armor, konstruksi kubah, rantai kendaraan, komponen suspensi, komponen mesin, serta perisai pelindung untuk komponen vital lainnya. (Hafeezur dkk, 2024). Performa balistik MMC dalam hal ini mengalahkan logam dasarnya.

Menurut penelitian yang dilakukan Kannan dkk, 2023, material aluminium AA6061-T6 memiliki keunggulan dalam versatilitas, kemudahan dalam pengerjaan, kemampuan penyambungan, sehingga menjadi material yang cocok untuk pembuatan pelat baja pelindung. Dengan kekuatan tinggi dan ketahanan korosi yang baik, material ini banyak digunakan dalam industri dirgantara, kelautan, dan militer.

2.3. Penguat dalam AMC

Penggunaan penguat dalam matriks aluminium bertujuan untuk menciptakan material hibrida yang memiliki sifat mekanik dan fisik melampaui kemampuan logam induknya tunggal. Material penguat ini berfungsi untuk memikul beban eksternal yang disalurkan melalui matriks, sehingga meningkatkan nilai kekakuan (*stiffness*), kekuatan spesifik, ketahanan aus, serta stabilitas pada suhu tinggi. Secara umum, penguat dalam AMC diklasifikasikan menjadi penguat kontinu (serat panjang) dan diskontinu, yang meliputi partikel, *whisker*, atau serat pendek. Pemilihan jenis penguat sangat bergantung pada aplikasi akhir, di mana penguat keramik umumnya dipilih untuk ketahanan aus yang tinggi, sementara penguat karbonaceous seperti CNT digunakan untuk mencapai rasio kekuatan-terhadap-berat yang optimal (Krishnan, P., 2022; Bhanuprakash dkk, 2023).

Untuk keperluan militer, material pelindung harus ringan, efektif dalam biaya



Gambar 2.3 Metal matrix composite reinforcements (Krishnan, P., 2022)

pembuatan, dan yang terakhir harus kuat menahan serangan balistik. Campuran penguat yang umumnya digunakan sebagai matriks komposit aluminium adalah alumina (Al_2O_3), boron karbida (B_4C), dan silikon karbida (SiC) karena sifat mereka mempunyai densitas rendah, kekuatan kompresif tinggi, dan kekerasan yang sangat baik (Jinnapat, A. dkk, 2023)

Kemudian untuk nanomaterial yang mempunyai ukuran partikel 1-100 nm pada setidaknya 1 dimensi. Menurut Wu dkk, 2023, struktur dari empat jenis nanomaterial berbasis karbon dengan geometri yang berbeda telah dikembangkan. Dengan rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat besar, kekuatan mekanik yang luar biasa, serta kemampuan optimal dalam menyerap energi, beberapa nanomaterial, seperti *carbon nanotubes* (CNTs), grafena, dan turunannya, sedang diteliti untuk diaplikasikan sebagai material ringan yang tahan terhadap dampak dan balistik.

Selain meningkatkan sifat mekanik melalui transfer beban, partikel penguat dalam Aluminium Matrix Composites (AMC) juga berperan dalam mekanisme

penguatan mikrostruktural seperti *Zener pinning* (Mekanisme Zener) dan *Orowan strengthening* (Penguatan Orowan).

Mekanisme Zener merupakan mekanisme di mana partikel penguat halus yang terdispersi dalam matriks menghambat pergerakan batas butir selama proses pemanasan atau rekristalisasi. Partikel bertindak sebagai penghalang pertumbuhan butir sehingga menghasilkan ukuran butir yang lebih halus dan stabil. Berdasarkan hubungan Hall–Petch, penghalusan butir ini berkontribusi langsung pada peningkatan kekuatan dan kekerasan material (Kar, A. dkk, 2024; Rocha dkk, 2024; Zulfia dkk, 2018).

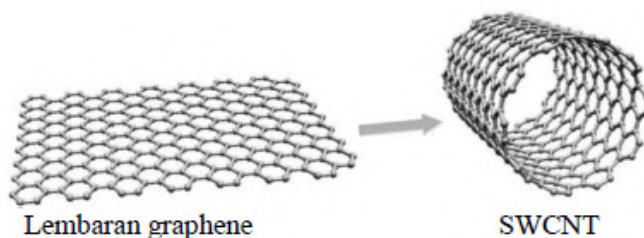
Sementara itu, Orowan strengthening terjadi ketika dislokasi yang bergerak akibat pembebanan terhalang oleh partikel penguat keras yang tidak dapat ditembus. Dislokasi akan membengkok di antara partikel dan mengelilinginya. *Loop* dislokasi ini menciptakan hambatan tambahan terhadap pergerakan dislokasi berikutnya, sehingga meningkatkan tegangan luluh dan kekuatan material secara keseluruhan (Sharma dkk, 2024; Bhanuprakash dkk, 2023; Chernyshov dkk, 2019).

Dari berbagai pilihan material penguat yang tersedia, penulis memilih carbon nanotubes (CNT) dan aluminium oxide (Al_2O_3) nanopartikel sebagai variabel uji dalam penelitian ini. Pemilihan ini didasarkan pada karakteristik unggul masing-masing material dalam meningkatkan sifat mekanik komposit.

2.3.1. Carbon Nanotube (CNT)

Carbon nanotube (CNT) merupakan material penguat satu dimensi (1D) yang terdiri dari lembaran grafena silindris dengan sifat mekanik luar biasa, termasuk kekuatan tarik mencapai 100 GPa dan modulus elastisitas sekitar 1 TPa . Dalam sistem AMC, CNT memberikan kontribusi penguatan melalui mekanisme transfer beban (*load transfer*), di mana tegangan geser antar muka memindahkan beban dari matriks aluminium yang lunak ke CNT yang memiliki kekuatan tinggi (Wu dkk, 2023; Shan dkk, 2020). Selain memperkuat secara mekanik, menurut Rahmani dkk, 2024 CNT juga berperan dalam meningkatkan ketangguhan material melalui mekanisme jembatan retak (*crack bridging*) dan *pull-out*, yang secara efektif menyerap energi benturan dan menghambat perambatan retak katastrofik. Dengan sifatnya yang unik dan berbagai potensi aplikasinya, CNT telah menjadi salah satu

material yang paling banyak diteliti dalam beberapa tahun terakhir. (Anggoro, P. dkk, 2021).



Gambar 2.4 Pembentukan *Single-Wall Carbon Nanotubes*(SWCNT) dari lembaran *graphene* (Anggoro, P. dkk, 2021)

Penggunaan CNT dalam AMC seringkali membutuhkan teknik fabrikasi khusus seperti metalurgi serbuk atau *friction stir processing* untuk mengatasi gaya Van der Waals yang kuat yang memicu penggumpalan (*clustering*) partikel. Jika terdispersi secara merata, CNT mampu meningkatkan batas balistik dan kapasitas penyerapan energi material secara signifikan tanpa menambah beban massa yang besar pada struktur (Sarmah dkk, 2024).

Penelitian yang dilakukan oleh Rahmani dkk, 2024 menyelidiki pengaruh penambahan *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNTs) pada *fiber-metal laminates*. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi optimal MWCNTs sebesar 0,4 wt.% meningkatkan performa balistik secara signifikan, dengan peningkatan batas balistik sebesar 6,80% dan energi serap sebesar 13,75% pada sampel tanpa *shot peening*. Pada sampel yang mengalami *shot peening*, batas balistik meningkat 8,50% dan energi serap naik 17,45%. Namun, konsentrasi 0,6 wt.% menyebabkan penurunan performa mekanik akibat aglomerasi. Analisis mikroskop elektron menunjukkan peningkatan sifat adhesi pada konsentrasi optimal. Penelitian ini mengkonfirmasi potensi MWCNTs dalam meningkatkan kinerja laminates untuk aplikasi balistik.

2.3.2. Aluminium Oxide (Al_2O_3)

Alumina (Al_2O_3) merupakan salah satu material penguat keramik yang paling banyak digunakan dalam AMC setelah silikon karbida karena kompatibilitas antar mukanya yang sangat baik dengan aluminium Sharma dkk, 2024, Bhanuprakash

dkk, 2023. Penggunaan Al_2O_3 dalam ukuran nano memberikan keunggulan signifikan dibandingkan ukuran mikro, di mana partikel nano memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih tinggi untuk mendistribusikan beban secara lebih efektif (Islam dkk, 2020; Awate, 2022). Mekanisme penguatan utama yang terjadi meliputi penguatan Orowan, di mana partikel nano bertindak sebagai penghalang pergerakan dislokasi di dalam struktur kristal. Selain itu, partikel nano Al_2O_3 berfungsi sebagai situs nukleasi heterogen selama proses pembekuan yang memicu terjadinya penghalusan butir (grain refinement) melalui efek pinning pada batas butir. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel Al_2O_3 pada matriks Al6061 dapat meningkatkan kekuatan tarik hingga 130% dan kekerasan hingga 156% dibandingkan logam murninya (Awate, 2022). Namun, tantangan utama dalam penggunaan penguat nano ini adalah kecenderungannya untuk mengalami aglomerasi akibat energi permukaan yang tinggi serta risiko pembentukan porositas jika volume fraksi melebihi batas kritis (Sajjadi, 2011).

Dalam penelitian yang dilakukan Kurzawa dkk, 2020, material komposit dengan matriks EN AW-7075 yang diperkuat partikel $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ sebesar 30% dan 40% vol. Pengujian dampak dilakukan menggunakan proyektil $7,62 \times 39$, dan hasilnya menunjukkan mekanisme kerusakan berupa retakan radial dan fragmentasi rapuh di sekitar lubang tembus. Retakan terutama menyebar melalui matriks dan batas partikel. Kombinasi investigasi mikroskopis dan numerik terbukti efektif dalam menganalisis perilaku material. Volume penguat ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) secara signifikan memengaruhi diameter lubang masuk dan keluar, di mana peningkatan volume penguat menunjukkan pengaruh positif terhadap ketahanan material terhadap dampak. Temuan ini menegaskan pentingnya optimasi volume penguat dalam desain material komposit untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan dampak tinggi.

Zou dkk, 2024 menyimpulkan bahwa penambahan nano- Al_2O_3 memengaruhi kepadatan relatif, kekerasan, dan mikrostruktur komposit matriks aluminium. Peningkatan kandungan nano- Al_2O_3 dari 0% hingga 5% menyebabkan penurunan kepadatan relatif dari 0,986 menjadi 0,971, menunjukkan bahwa kandungan nano- Al_2O_3 yang lebih tinggi dapat mengurangi kepadatan material. Kekerasan komposit mencapai nilai maksimum 31,7 HV pada kandungan nano- Al_2O_3 2%, namun tidak meningkat lebih lanjut di atas titik ini, mengindikasikan adanya kisaran

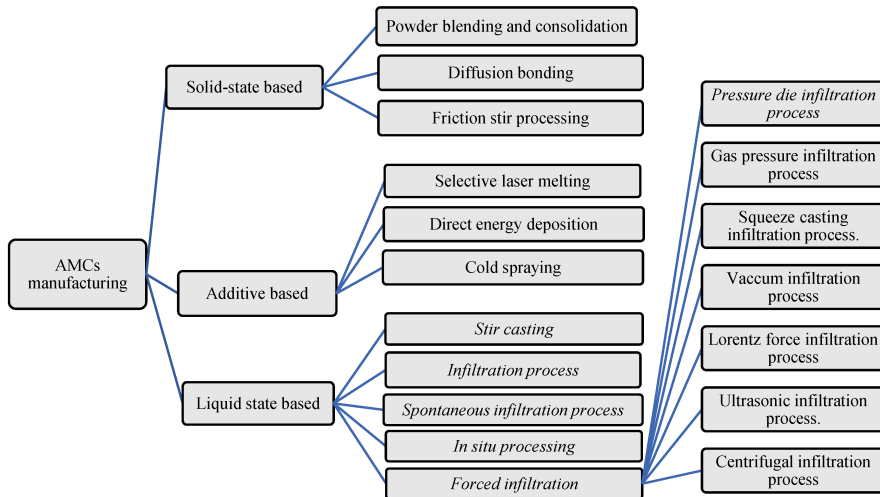
optimal untuk mencapai kekerasan maksimal. Hasil pengamatan SEM menunjukkan tidak adanya porositas dan distribusi partikel nano- Al_2O_3 yang merata dalam matriks aluminium, yang sangat penting untuk meningkatkan sifat mekanik komposit. Temuan ini menegaskan bahwa kandungan nano- Al_2O_3 perlu dioptimalkan untuk mencapai keseimbangan antara kepadatan, kekerasan, dan integritas struktural.

Dalam sistem AMC ini, CNT dan nano- Al_2O_3 berfungsi sebagai penguat fase padat yang tetap stabil secara termal selama proses peleburan aluminium, sehingga tidak larut dalam matriks dan mempertahankan perannya sebagai penghambat dislokasi serta perambatan retak.

2.4. Metode Fabrikasi AMC

Fabrikasi komposit matriks aluminium (AMC) melibatkan berbagai teknik yang dirancang untuk menggabungkan material penguat ke dalam matriks aluminium secara efektif. Pemilihan metode fabrikasi sangat penting karena memengaruhi distribusi penguat, ikatan antarmuka, dan sifat mekanik akhir dari komposit. Secara umum, metode fabrikasi AMC dapat dikategorikan menjadi beberapa pendekatan utama, termasuk metode berbasis cairan (seperti pengecoran), metode berbasis padatan (seperti metalurgi serbuk), dan metode berbasis deformasi (seperti penggilingan mekanis). Setiap metode memiliki kelebihan dan keterbatasan tersendiri, yang perlu disesuaikan dengan jenis material penguat, persentase penguat, dan aplikasi akhir yang diinginkan.

Berbagai metodologi digunakan dalam proses pembuatan produk MMC (Metal Matrix Composites) berkualitas tinggi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, teknik utama untuk memproduksi AMC (Aluminium Matrix Composites) dalam skala industri dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori besar:



Gambar 2.5 Teknik manufaktur AMC (Kar, A. dkk, 2024)

2.4.1. *Stir Casting*

Merupakan salah satu metode fabrikasi liquid-state yang paling ekonomis, sederhana, dan populer secara komersial untuk memproduksi *Aluminum Matrix Composites* (AMCs) (Kar, A. dkk, 2024; Mussatto dkk, 2021). Metode ini, yang juga dikenal sebagai *vortex technique*, bekerja dengan cara mencairkan material matriks dalam krusibel, menambahkan material penguat (*reinforcement*), dan mengaduk campuran tersebut secara mekanis untuk menciptakan pusaran (*vortex*) agar mendapatkan dispersi yang rata. Keuntungan utamanya meliputi fleksibilitas proses dan kesesuaian untuk produksi komponen berukuran besar. Namun, stir-casting memiliki kelemahan signifikan seperti porositas tinggi akibat gas yang terperangkap, *wettability* (kebasahan) yang buruk antara logam cair dan keramik, serta kecenderungan partikel untuk menggumpal (*agglomeration*) atau mengendap karena perbedaan densitas (Kar, A. dkk, 2024; Sharma, A. K. dkk, 2020).

Sathish, S. dkk, 2024 melakukan penelitian, partikel penguat *fly ash* dan TiB₂ dipanaskan terlebih dahulu pada suhu 600 °C dan 500 °C dalam *furnace* untuk menghilangkan kandungan air sebelum ditambahkan ke logam cair. Matriks dasar yang digunakan adalah logam LM25 dalam bentuk ingot yang dilebur pada suhu 800 °C dan didinginkan hingga 750 °C untuk membentuk *slurry*. Proses pengadukan

dilakukan menggunakan *stirrer* empat bilah selama 10 menit dengan kecepatan 500 rpm. Selama pengadukan, sejumlah kecil magnesium ditambahkan untuk meningkatkan *wettability* antara partikel penguat dan matriks logam. Langkah-langkah ini dilakukan untuk memastikan dispersi partikel penguat yang merata dan meningkatkan kualitas ikatan antarmuka, sehingga menghasilkan komposit dengan sifat mekanik yang lebih baik.

2.4.2. Squeeze Casting

Squeeze casting adalah teknik yang menggabungkan prinsip pengecoran gravitasi dan penempaan (*closed-die forging*). Dalam proses ini, tekanan tinggi (biasanya berkisar antara 10 hingga 100 MPa atau lebih) diterapkan secara mekanis pada logam cair selama fase pembekuan di dalam cetakan. Penerapan tekanan ini meningkatkan laju pembekuan dan mengubah titik leleh paduan, yang menghasilkan penghalusan mikrostruktur serta eliminasi cacat porositas gas maupun penyusutan. *Squeeze casting* menghasilkan material dengan sifat mekanik yang setara dengan produk tempa (*wrought*) dan memastikan ikatan antar-muka yang lebih kuat antara matriks dan penguat karena partikel dipaksa menyatu dengan logam cair di bawah tekanan.

Teknik ini mampu mengubah titik leleh paduan, meningkatkan laju solidifikasi, serta memperbaiki struktur mikro dan makro material, sehingga mengurangi porositas akibat gas dan penyusutan. Ukuran partikel penguat juga memengaruhi kekuatan material, di mana ukuran butir yang lebih kecil memberikan peningkatan properti yang lebih baik. Kombinasi efek *undercooling* dan laju pendinginan yang tinggi akibat tekanan tinggi dalam *squeeze casting* menghasilkan perbaikan mikrostruktur dan peningkatan sifat mekanik, baik pada paduan maupun komposit, ketika parameter proses dikontrol dengan baik (Dhanashekar dkk, 2014).

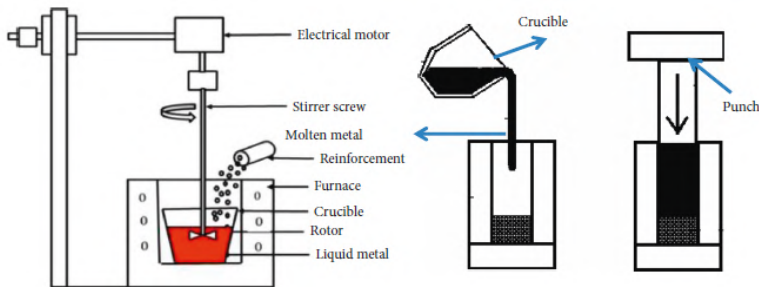
2.4.3. Stir-Squeeze Casting

Metode *Stir-Squeeze Casting* (SSC), yang akan digunakan dalam penelitian ini, merupakan metode hibrida yang dirancang untuk menggabungkan efisiensi pencampuran *stir casting* dengan kepadatan tinggi dari *squeeze casting*. Prosedur ini dilakukan secara berurutan: pertama, matriks aluminium dilelehkan dan diaduk

bersama partikel penguat untuk mencapai distribusi yang homogen, kemudian campuran tersebut segera dituang ke dalam cetakan dan diberikan tekanan tekan (*squeeze pressure*) selama proses solidifikasi berlangsung. Penggabungan ini sangat efektif untuk mengatasi masalah porositas yang sering muncul pada stir casting biasa dan menghasilkan material dengan struktur yang lebih padat serta butiran yang lebih halus. Parameter kunci yang harus Anda perhatikan dan optimalkan meliputi kecepatan pengadukan (*stir speed*), waktu pengadukan, suhu leleh, dan besarnya tekanan tekan guna mencapai kekuatan tarik dan kekerasan yang maksimal. Dengan metode SSC, Anda dapat memastikan difusi yang lebih baik dan ikatan antar-muka yang jauh lebih kuat antara matriks aluminium dan penguat keramik, sehingga menghasilkan material AMC berkualitas tinggi (Vijayakumar dkk, 2022; (Gugulothu dkk, 2022)

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Gugulothu dkk, 2022, metode Taguchi digunakan untuk merancang 16 eksperimen (L1–L16) dengan variasi parameter pada empat level. Logam AA7475 dilebur dalam furnace bersama pengaduk, kemudian dicampur dengan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{B}_4\text{C}/\text{TiB}_2$ dalam berbagai persentase berat untuk menghasilkan komposit hibrida. Penambahan 5–10 g Na_3AlF_6 selama proses peleburan dilakukan untuk mengurangi slag dan meningkatkan efektivitas pengecoran. Proses *stir-squeeze casting* (SSC) melibatkan peleburan logam pada suhu 750 °C, pencampuran serbuk penguat yang dipanaskan pada 280 °C, dan pengadukan selama 5–10 menit sebelum diaplikasikan tekanan 50 MPa selama 1–2 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik maksimum (325 MPa) dicapai pada eksperimen L1 dengan parameter kecepatan pengadukan 300 rpm, suhu peleburan 750 °C, tekanan *squeeze* 50 MPa, dan kandungan penguat 2wt%. Sementara itu, kekerasan maksimum (130,6 Hv) diperoleh pada eksperimen L7 dengan kecepatan pengadukan 350 rpm, suhu peleburan 850 °C, tekanan *squeeze* 125 MPa, dan kandungan penguat 2wt%. Analisis ANOVA mengungkapkan bahwa faktor paling signifikan dalam meningkatkan kekuatan tarik adalah kandungan penguat (38,9%), diikuti tekanan *squeeze* (28,4%), kecepatan pengadukan (13,6%), dan suhu peleburan (12,16%). Untuk kekerasan, tekanan *squeeze* memiliki pengaruh terbesar (50,26%), diikuti suhu peleburan (38,23%), kecepatan pengadukan (5,71%), dan kandungan penguat (4,52%). Temuan ini menunjukkan

bahwa parameter proses dan komposisi material berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik komposit yang dihasilkan.



Gambar 2.6 Set-up metode fabrikasi *stir-squeeze casting* (Gugulothu dkk, 2022)

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Al-Maharbi & Al-Subhi, 2024, nanocomposit aluminium berhasil dikembangkan menggunakan metode *stir-squeeze casting* dengan dan tanpa ultrasonikasi, di mana nanopartikel SiC digunakan sebagai material penguat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ultrasonikasi memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan sifat mekanik material, termasuk penurunan porositas dan peningkatan ketahanan aus. Kekerasan material mencapai nilai tertinggi sebesar 70,8 HRB, sementara kehilangan material akibat aus abrasif tercatat hanya 0,0017 g ketika ultrasonikasi diaplikasikan.

Stir casting memungkinkan distribusi partikel penguat yang lebih homogen dalam matriks aluminium melalui proses pengadukan, sementara *squeeze casting* meningkatkan densitas material dengan mengurangi porositas melalui penerapan tekanan saat proses solidifikasi. Kombinasi kedua metode ini diharapkan dapat menghasilkan AMC dengan sifat mekanik yang lebih optimal

2.5. Aplikasi AMC dalam Pengujian Balistik

Komposit Matriks Aluminium (AMC) telah menjadi bahan yang semakin penting dalam dunia balistik, pertahanan, dan peperangan karena kombinasi uniknya antara ringan, kekuatan tinggi, dan ketahanan terhadap kondisi ekstrem. Matriks aluminium yang diperkuat dengan bahan penguat seperti serat keramik, partikel, atau nanomaterial, secara signifikan meningkatkan sifat mekanik dan termalnya. Dalam

aplikasi balistik, AMC digunakan untuk membuat pelindung badan dan kendaraan lapis baja ringan yang mampu menahan dampak proyektil dan ledakan, dengan bobot yang ringan untuk mobilitas yang lebih baik. Dalam pertahanan, material ini digunakan dalam komponen struktural pesawat, kapal, dan kendaraan militer, di mana kekuatan dan ketahanan terhadap korosi serta kelelahan sangat penting. Selain itu, AMC juga digunakan dalam sistem persenjataan, seperti peluru dan komponen senjata, untuk meningkatkan kinerja dan daya tahan. Keunggulan AMC dalam mengurangi berat tanpa mengorbankan kekuatan membuatnya ideal untuk aplikasi militer yang memerlukan efisiensi bahan bakar dan mobilitas tinggi.



Gambar 2.7 Personel kendaraan berlapis baja juga membutuhkan rompi anti peluru yang ringan dan kuat

Dalam pengujian balistik, respons material AMC terhadap impact berkecepatan tinggi tidak hanya ditentukan oleh sifat mekaniknya, tetapi juga oleh mekanisme kegagalan yang terjadi selama penetrasi. Beberapa mekanisme kegagalan yang umum diamati pada material logam dan komposit matriks aluminium antara lain:

1. *Shear plugging* terjadi ketika proyektil mendorong material target tepat di depannya hingga terlepas dalam bentuk sumbat akibat dominasi tegangan geser yang tinggi. Mekanisme ini umum dijumpai pada pelat logam atau

komposit dengan ketebalan tertentu di bawah kondisi impak normal (Kumar dkk, 2023).

2. *Spalling* merupakan fenomena terlepasnya fragmen material pada sisi belakang target akibat gelombang tarik refleksi setelah gelombang tekan dari impak mencapai permukaan bebas. Mekanisme ini sering terjadi pada material yang relatif getas atau pada AMC dengan fraksi volume penguat tinggi (Kurzawa dkk, 2020).
3. *Petalling* ditandai dengan terbentuknya pola menyerupai kelopak bunga di sekitar lubang penetrasi. Mekanisme ini umumnya terjadi pada material yang lebih ulet, di mana deformasi plastis mendominasi sebelum terjadinya fraktur (Sofyan dkk, 2013).
4. *Adiabatic shear bands* (ASB) terbentuk pada regangan tinggi, yaitu pita deformasi sempit akibat pelunakan termal lokal yang dipicu oleh kenaikan temperatur sangat cepat. Lokalisasi deformasi ini mempercepat inisiasi retak dan kegagalan material (Magarajan dkk, 2023).
5. *Hertz cone effect* terjadi pada material getas, yaitu retakan berbentuk kerucut yang berkembang dari titik impak dan menyebar mengikuti arah tegangan utama, menyebabkan stratifikasi atau pemisahan lapisan material (Kurzawa dkk, 2020).

Penelitian oleh Hafeezur dkk, 2024 menyelidiki sifat balistik dan mekanik dari AINPB MMCs yang diperkuat dengan serpihan nano graphene berdekorasi TiCN, dengan pengisian optimal filler sebesar 4 wt%. Hasil uji balistik menunjukkan hasil yang memuaskan, mengindikasikan bahwa material ini memiliki potensi untuk meningkatkan performa dan daya tahan kendaraan lapis baja ringan. Temuan ini menawarkan wawasan penting dalam pengembangan material komposit untuk aplikasi pertahanan yang lebih efisien dan tahan lama.

Kemudian Kumar dkk, 2023 melakukan investigasi kinerja balistik dari AMC Al-Si12Cu yang diperkuat oleh $ZrSiO_4$ untuk mengetahui efektivitas material tersebut menahan penetrasi peluru. Diketahui bahwa partikel $ZrSiO_4$ yang lebih halus memberikan kinerja balistik lebih tinggi. Secara eksperimental hasilnya

kecepatan residual peluru menurun hingga 34%, 29%, dan 22% dengan variasi ukuran partikel penguat. Penelitian ini mengindikasikan kinerja balistik AMC menjadi lebih baik dengan ukuran partikel penguat yang lebih halus.

Kannan dkk, 2023 Mencoba mensimulasikan secara numerik dan mengevaluasi kinerja balistik pada pelat AMC AA6061-T6 yang ditembakkan dengan proyektil berukuran 7,62 AP, pada kecepatan 500 m/s. Dengan ketebalan pelat pada 18mm yang diperkuat dengan berbagai material keramik penguat seperti Al_2O_3 , hBN, dan rGO. Hasilnya adalah material hBN mendapati kinerja paling baik, hal ini dibuktikan dalam hal penyerapan energi kinetik, deformasi pelat, dan penurunan kecepatan peluru saat impact.

2.6. Simulasi Impact Balistik Menggunakan Studi Numerik

Simulasi impact balistik merupakan salah satu pendekatan penting dalam menganalisis kinerja material atau struktur ketika mengalami tumbukan berkecepatan tinggi. Studi numerik, seperti metode elemen hingga (*finite element method/FEM*), telah menjadi alat yang sangat efektif untuk memprediksi respons material terhadap beban dinamis tanpa perlu melakukan pengujian fisik yang mahal dan rumit. Dimulai dengan pembuatan model geometri proyektil dan target menggunakan ANSYS atau perangkat lunak CAD lainnya. Setelah model dibuat, langkah berikutnya adalah proses pemeshan (*discretization*), di mana model dipecah menjadi elemen-elemen kecil menggunakan metode elemen hingga (FEM) untuk meningkatkan akurasi perhitungan. Selanjutnya, properti material seperti densitas, modulus elastisitas, kekuatan tarik, regangan patah (yang didapat dari pengujian mekanik), dan model kegagalan material (misalnya Johnson-Cook atau Cowper-Symonds) dimasukkan ke dalam simulasi. Kemudian, kecepatan proyektil disesuaikan dengan standar NIJ kelas RF1, sementara kondisi batas target diatur agar sesuai dengan skenario pengujian sebenarnya.



Gambar 2.8 Salah satu contoh senjata api kelas RF1

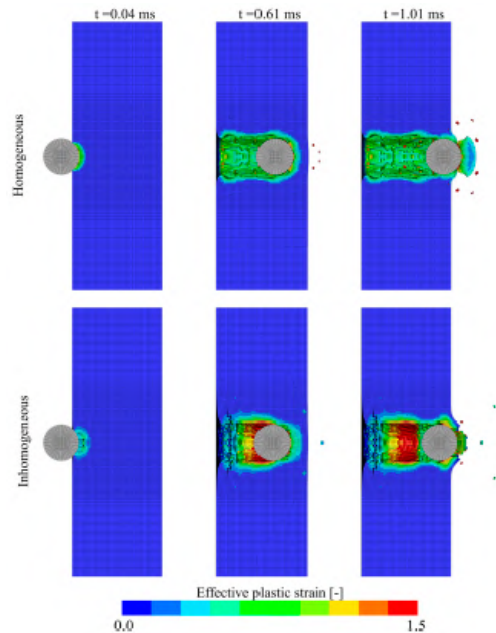
Standar uji balistik NIJ RF1 adalah bagian dari NIJ Standard-0101.07, yang diterbitkan oleh *National Institute of Justice* (NIJ) pada April 2024. Standar ini menggantikan standar sebelumnya, NIJ Standard-0101.06, dan menetapkan persyaratan kinerja minimum serta metode uji untuk ketahanan balistik rompi anti-peluru yang digunakan oleh penegak hukum di Amerika Serikat.

Persyaratan standar uji balistik NIJ kelas RF1 adalah:

1. Peluru 7,62×51mm NATO M80 Ball Full Metal Jacketed (FMJ) Steel Jacket dengan berat 147 grain (± 3 grain) pada kecepatan 2780 ft/s (847 m/s).
2. Peluru 7,62×39mm Mild Steel Core (MSC) Ball Ammunition Type 56 dari Pabrik 31 pada kecepatan 2400 ft/s (732 m/s).
3. Peluru 5,56×45mm NATO M193 dengan berat 56 grain (± 2 grain) pada kecepatan 3250 ft/s (990 m/s).

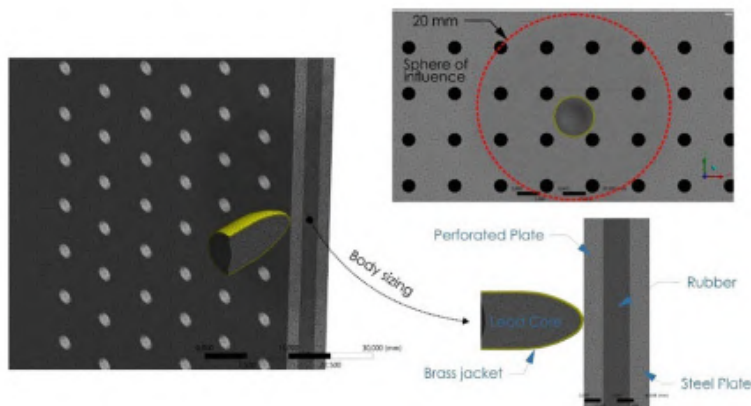
Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk mengevaluasi distribusi tegangan dan regangan, deformasi dan penetrasi proyektil, energi yang diserap oleh material, serta potensi retak atau kegagalan struktural. Dengan pendekatan ini, studi secara numerik memungkinkan optimasi desain material AMC sebelum pengujian fisik, menghemat biaya dan waktu, serta meningkatkan efektivitas pengembangan material tahan balistik.

Penelitian numerik yang dilakukan oleh Bakri dkk, 2023, dapat disimpulkan bahwa simulasi numerik menggunakan *ANSYS Workbench* 15.0 berhasil memodelkan dinamika secara eksplisit dari panel komposit terhadap serangan proyektil. Dalam simulasi ini, *meshing* panel komposit dibuat dalam bentuk *tetrahedron*, dengan pembagian *meshing* kasar berukuran 2 mm untuk area yang jauh dari titik tumbukan proyektil, serta *meshing* halus berukuran 0,8 mm dalam radius 20 mm di sekitar area tumbukan. Proyektil yang digunakan adalah kaliber 9



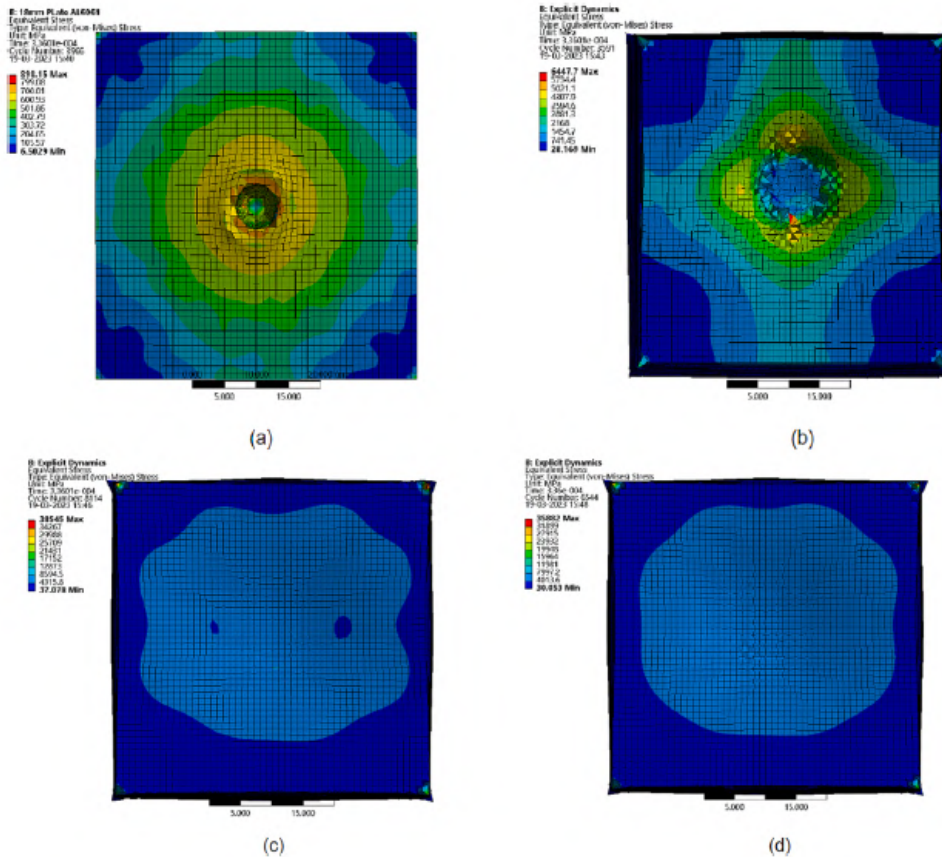
Gambar 2.9 Contoh hasil pengujian balistik dengan cara numerikal Brekken dkk, 2022

mm Full Metal Jacket (FMJ) yang dibalut timah dan kuningan. Kondisi batas dalam simulasi ditetapkan dengan *fix support* pada sisi luar pelat belakang, sementara target dan proyektil dimodelkan sebagai benda fleksibel dengan kontak tanpa gesekan (*frictionless*). Simulasi balistik dilakukan dengan menghitung waktu dari momen awal penetrasi proyektil hingga proyektil berhenti pada waktu $1,1 \times 10^{-4}$ detik. Selama proses ini, data tegangan dan deformasi dianalisis untuk memahami bagaimana panel komposit merespons tumbukan proyektil. Variabel yang diuji meliputi posisi penetrasi proyektil, baik di tengah lubang, sisi lubang, maupun di tengah empat lubang pada pelat berlubang.



Gambar 2.10 Meshing dalam penelitian balistik yang dilakukan Bakri dkk, 2023

Sekarang membahas lebih mendalam mengenai evaluasi balistik yang dilakukan secara numerik oleh Kannan dkk, 2023, simulasi impak balistik dilakukan dengan mendefinisikan properti material untuk semua komponen, termasuk densitas, modulus elastisitas, rasio Poisson, dan kekuatan luluh, yang diambil dari *Ansys Library (Engineering Data)* untuk pelat dasar AA6061-T6 dan proyektil baja 1006. Proyektil dimodelkan menggunakan material baja 1006, dengan asumsi bahwa penetrasi hanya dapat disebabkan oleh inti baja yang keras, dan seluruh bagian proyektil (inti dan ekor) dianggap sebagai satu kesatuan. *ANSYS Material Designer* digunakan untuk membuat penguat keramik, dengan opsi pemeshan seperti *tetrahedral*, *hexahedral*, dan *hybrid*. Geometri persegi digunakan untuk menganalisis material komposit *unidirectional* dengan fraksi volume serat 0,5 dan diameter serat $5\mu\text{m}$. Proses pemeshan dilakukan di *ANSYS AUTO-DYN* untuk menghasilkan jumlah elemen optimal yang diperlukan, dengan ukuran mesh konstan 1 mm untuk proyektil dan elemen tetrahedral linier untuk menangani geometri kompleks seperti permukaan melengkung, lubang, dan fitur tidak beraturan. Pendekatan ini memastikan akurasi simulasi dalam menganalisis distribusi tegangan, deformasi, dan kinerja material terhadap impak balistik.



Gambar 2.11 Hasil tegangan ekuivalen yang ditahan oleh empat jenis pelat target monolitik akibat tumbukan proyektil dengan kecepatan 500 m/s Kannan dkk, 2023

Dalam penelitian ini, sifat material AMC yang menggunakan variasi penguat tidak tersedia dalam library bawaan *software*. Oleh karena itu, pengujian mekanik, khususnya uji tarik, perlu dilakukan untuk memperoleh data kurva *stress-strain* yang akurat. Data ini akan menjadi dasar dalam pemodelan material agar simulasi dapat merepresentasikan perilaku sebenarnya dari AMC saat mengalami impact balistik.

Setiap simulasi numerik dalam pengujian balistik mengacu pada model kegagalan material, yang menggambarkan bagaimana material akan mengalami deformasi, retak, atau patah saat terkena tumbukan proyektil. Salah satu model kegagalan yang umum digunakan dalam analisis balistik khususnya target pelat material logam, berlubang maupun tidak adalah Johnson-Cook (Johnson, Johnson dkk, 1983, 1985), yang mempertimbangkan efek *true stress-strain*, laju regangan,

dan temperatur dalam memprediksi kegagalan material. Persamaan 2.1 menampilkan model kegagalan Johnson-Cook.

Karena ANSYS tidak menyediakan model kegagalan secara langsung, parameter dari model Johnson-Cook harus diinput secara manual dalam bentuk data numerik, seperti grafik true stress-strain, yang biasanya dimasukkan melalui file Excel.

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}) (1 - T^m) \quad (2.1)$$

σ_{eq} : stress ekuivalen (MPa)

A : kekuatan awal material (MPa)

B : konstanta pengerasan regangan (*strain hardening*)

ε : regangan plastis

n : eksponen pengerasan regangan

C : konstanta efek laju regangan

$\dot{\varepsilon}$: laju regangan (s^{-1})

T : efek temperatur pada kekuatan material

m : eksponen pelemahan termal

2.7. Pengujian Sifat Mekanik AMC

2.7.1. Uji Kekerasan

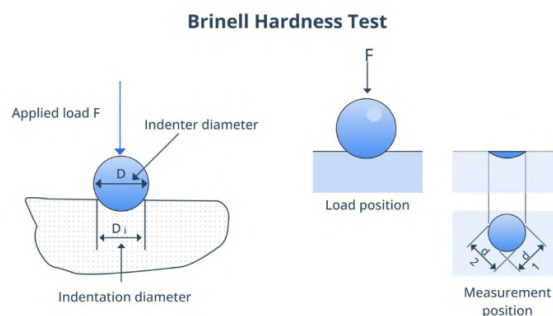
Pengujian kekerasan merupakan salah satu bentuk pengujian mekanik yang krusial, baik untuk logam ferrous maupun non-ferrous. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengukur ketahanan material terhadap deformasi plastis ketika diberikan beban atau gaya eksternal. Prinsip dasarnya melibatkan penekanan indenter pada permukaan spesimen uji yang telah dipersiapkan sebelumnya. Besaran beban yang diterapkan bervariasi tergantung pada jenis logam dan metode pengujian yang dipilih. Terdapat tiga metode pengujian kekerasan yang paling umum digunakan untuk logam, yaitu metode *Brinell*, metode *Vickers*, dan metode *Rockwell*.

1. Metode *Brinell*

Metode Kekerasan Brinell adalah salah satu teknik pengujian kekerasan material yang paling tua dan banyak digunakan. Metode ini dikembangkan oleh insinyur Swedia, Johan August Brinell, pada tahun 1900. Prinsip dasar dari metode Brinell adalah mengukur ketahanan material terhadap deformasi plastis dengan cara menekan permukaan material menggunakan indenter berbentuk bola dengan beban tertentu selama waktu tertentu.



Gambar 2.12 Pengujian *Brinell hardness* (Sumber: <https://emcotest.com>)



Gambar 2.13 Skema pengujian *Brinell* (Sumber: <https://xometry.pro>)

Harga kekerasan diperoleh dari persamaan berikut ini:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

P: Beban bola penekanan yang diberikan (kgf)

D: Diameter bola penekanan (mm)

d: Diameter jejak (mm)

Pemilihan diameter bola indentor dan besaran beban yang digunakan dalam pengujian kekerasan Brinell disesuaikan dengan jenis logam dan ketebalan material yang diuji. Perubahan pada indentor akan diimbangi dengan penyesuaian beban yang diterapkan, sehingga nilai kekerasan Brinell (H_b) yang dihasilkan tetap konsisten.

$$\frac{p_1}{D_1^2} = \frac{p_2}{D_2^2} = \frac{p_3}{D_3^2} \quad (2.3)$$

Jika D terlalu besar dan P terlalu kecil, lekukan menjadi terlalu kecil dan sulit diukur, menghasilkan data yang keliru. Sebaliknya, jika D terlalu kecil dan P terlalu besar, bola bisa amblas, menyebabkan kesalahan dalam pengukuran kekerasan.

Beberapa parameter penting yang mempengaruhi harga kekerasan Brinell:

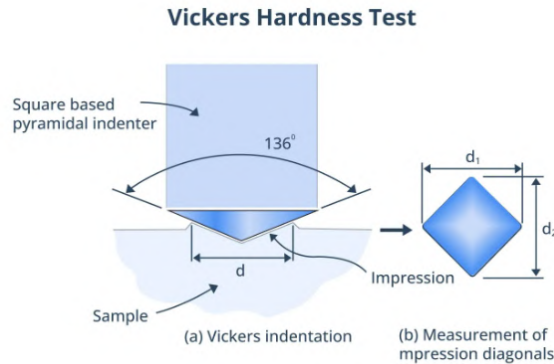
- (a) Kekerasan permukaan.
- (b) Posisi spesimen saat pengujian.
- (c) Kebersihan permukaan spesimen.

2. Metode *Vickers*

Pengujian kekerasan Vickers (*Vickers Hardness Test*, VHT) adalah metode uji kekerasan yang menggunakan indentor berbentuk piramida berbahan intan dengan sudut 136° . Indentor ini ditekan ke permukaan material dengan beban tertentu selama waktu tertentu. Setelah indentasi terbentuk, ukuran diagonal lekukan diukur untuk menentukan nilai kekerasannya.



Gambar 2.14 Pengujian *Vickers hardness* (Sumber: <https://emcotest.com>)



Gambar 2.15 Skema pengujian Vickers (Sumber: <https://xometry.pro>)

Harga kekerasan Vickers diperoleh dengan rumus:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2} \quad (2.4)$$

di mana:

HV: Nilai kekerasan Vickers (kgf/mm^2)

P: Beban yang diberikan (kgf)

d: Rata-rata panjang diagonal lekukan (mm)

Uji kekerasan *Vickers* mempunyai kelebihan dalam jangkauan pemeriksaan yang luas dengan pemakaiannya beban tunggal (HV5–HV1500). Beban yang dipakai biasanya antara 1 (satu)–120 kg.

3. Metode *Rockwell*

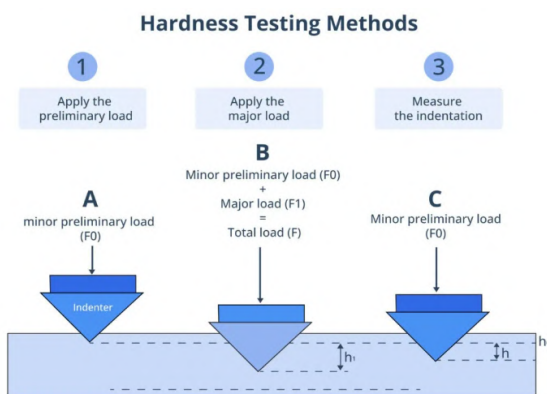
Pengujian kekerasan Rockwell (Rockwell Hardness Test, RHT) adalah metode uji kekerasan yang mengukur kedalaman lekukan yang dihasilkan oleh indenter dengan beban tertentu. Metode ini lebih cepat dibandingkan pengujian Vickers karena tidak memerlukan pengukuran optik, hanya membaca nilai langsung dari skala Rockwell pada alat uji.



Gambar 2.16 Pengujian *Rockell hardness* (Sumber: <https://xometry.pro>)

Indentor yang digunakan tergantung pada jenis material yang diuji:

- Baja keras - Indentor bola intan (*brale*) dengan sudut 120°.
- Logam lunak - Indentor bola baja (diameter 1/16" atau 1/8")



Gambar 2.17 Skema pengujian *Rockwell* (Sumber: <https://xometry.pro>)

Nilai kekerasan Rockwell (HR) dihitung dengan:

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (2.5)$$

di mana:

HR: Nilai kekerasan *Rockwell*

N: Konstanta tergantung skala (misalnya, 100 untuk skala HRC)

h: Kedalaman lekukan setelah beban ditetapkan (mm)

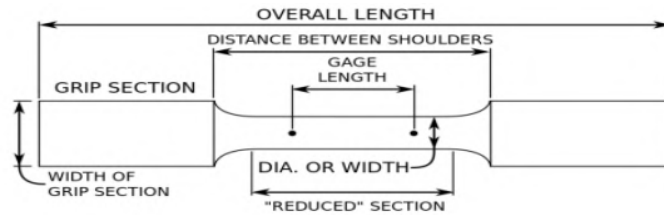
S: Faktor skala tergantung jenis *Rockwell* (misalnya, 0.002 mm untuk HRC)

Harga kekerasan *Rockwell* antara lain:

- (a) Metode Rockwell C (HRC), menggunakan indentor kerucut intan sudut 120° dengan diameter ujung 0,2 mm. Beban yang dipakai 150 kg dengan pre-load 10 kg. Pengujian untuk steel dan hardened steel dengan $h > (0,6-0,7)$ mm.
- (b) Metode Rockwell A (HRA), menggunakan indentor sama dengan Rockwell C dan beban yang sama pula 150 kg. pengujian untuk material $h < (0,4-0,6)$ mm.
- (c) Metode Rockwell B (HRB), menggunakan indentor baja bentuk bola dengan diameter $1/16''$ dan beban 100kg dipakai untuk material unhardened steel dan non ferrous.

2.7.2. Uji Tarik

Pengujian tarik adalah salah satu metode pengujian material yang paling umum digunakan di industri karena kemudahannya dan banyaknya data yang dapat diperoleh. Melalui pengujian ini, beberapa parameter penting dapat diukur, seperti kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength*), kekuatan mulur (*Yield Strength* atau *Yield Point*), elongasi (*Elongation*), elastisitas (*Elasticity*), dan pengurangan luas penampang (*Reduction of Area*). Seiring kemajuan teknologi, mesin uji tarik modern kini dilengkapi dengan perangkat elektronik canggih untuk memudahkan analisis data. Salah satu komponen penting dalam mesin uji tarik adalah *Load Cell*, yang berfungsi mengukur beban secara akurat menggunakan sistem pengolahan data terintegrasi. Meskipun perangkat elektronik telah mempermudah proses pengujian, peran manusia tetap dominan dalam menginterpretasikan hasil dan memastikan akurasi pengujian.



Gambar 2.18 Ilustrasi pengujian kekuatan tarik (Kurpatwar , 2024)

Uji tarik memberikan informasi mengenai kekuatan mekanik material dalam menahan beban tarik, seperti kekuatan luluh, kekuatan tarik ultimate, modulus elastisitas, dan regangan patah. Parameter ini sangat penting dalam simulasi balistik, karena menentukan ketahanan material terhadap deformasi plastis dan fraktur saat menerima gaya tumbukan proyektil. Material dengan kekuatan tarik dan regangan patah tinggi umumnya memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi dan retak akibat dampak. Dalam simulasi ANSYS, parameter dari uji tarik akan digunakan dalam model material untuk menentukan respons material terhadap beban dinamis, sehingga dapat memprediksi apakah suatu material akan mengalami deformasi plastis, retak, atau pecah akibat tumbukan proyektil. Dengan demikian, material yang memiliki kombinasi kekuatan tarik tinggi dan regangan patah optimal akan menunjukkan performa balistik yang lebih baik dibandingkan material dengan sifat mekanik yang lebih lemah.



Gambar 2.19 Contoh keadaan akhir spesimen uji tarik

2.7.3. Pengujian Metalografi

Metalografi merupakan bidang ilmu yang mempelajari struktur dan kondisi logam serta paduannya, serta hubungannya dengan sifat-sifat material tersebut.

Tujuan utama dari pengujian metalografi adalah untuk menganalisis kondisi logam atau paduan berdasarkan struktur mikro dan makronya dengan bantuan mikroskop. Melalui pengujian ini, berbagai informasi penting dapat diperoleh, seperti sifat material (ulet atau rapuh), geometri kristal, susunan atom, dan lainnya. Selain itu, metalografi juga dapat digunakan sebagai alat untuk mendiagnosis penyebab kerusakan atau kegagalan pada suatu komponen.

Ruang lingkup metalografi yang dibahas di sini terbatas pada teknik dasar yang menggunakan cahaya tampak (kasat mata), sehingga sering disebut sebagai metalografi optik atau metalografi cahaya kasat mata. Beberapa peralatan yang umum digunakan dalam proses metalografi antara lain:

1. Mesin Gerinda dengan ukuran grit 100 hingga 1200, berfungsi untuk meratakan dan menghaluskan permukaan spesimen.
2. Mesin Poles dengan ukuran grit 600 hingga 1200, digunakan untuk memperhalus permukaan spesimen sebelum pengamatan.
3. Mikroskop Optik dengan perbesaran hingga 1000X, digunakan untuk mengamati struktur mikro dan makro material.

Dengan peralatan tersebut, proses metalografi dapat dilakukan secara efektif untuk memahami karakteristik material dan mendukung analisis lebih lanjut terkait performa atau kegagalan material.