

Penggunaan Cairan Magnetorheologi untuk Meningkatkan Kinerja *Body Armor*

Nurin Krisfina Awalia Yasin^{1*}, Sovian Aritonang¹, Riri Murniati¹

¹Department of Chemistry, Faculty of Military Mathematics and Natural Sciences
Universitas Pertahanan Republik Indonesia (Unhan RI), Bogor 16810, Indonesia

*Email : nurin.yasin@mipa.idu.ac.id, soviaan.aritonang@idu.ac.id

ABSTRACT

In this journal, we will explain the use of Magnetorheological fluid (MRF) in body armor. The use of MRF material was chosen because its properties can be adjusted using external magnetic forces. The durability of the material structure will be tested using a 9 mm projectile and will be tested using a puncture. In tests carried out with projectiles, the MRF structure will experience a reduction in depth. Testing using a puncture will change the MRF structure to deform by 30% of the normal structure. The application of MRF to kevlar can increase energy absorption and can reduce the effects of bullet impacts. These results show quite good results compared to using other materials in making Kevlar. Apart from that, several advantages of MRFs from graphene in making body armor are also explained. This advantage was obtained from testing the mechanical properties of graphene against several other materials.

Key words: Magnetorheological Fluid (MRF), graphene, Body Armor, Kevlar.

PENDAHULUAN

Pelindung tubuh atau *body armor* merupakan suatu pelindung yang digunakan untuk mencegah atau melindungi individu dari suatu penggunaan secara kontak langsung senjata atau proyektil selama pertempuran atau berada di lokasi yang berbahaya[1][2]. Selain digunakan untuk perlindungan tubuh (*body armor*), armor juga digunakan pada kendaraan tempur (ranpur). Bahan penggunaan bahan armor bergantung pada jenis armor yang digunakan. Kekuatan masing-masing bahan juga berbeda setiap jenisnya. Secara umum, bahan tekstil yang digunakan untuk keperluan militer biasanya memiliki sifat mekanik dengan kekuatan yang luar biasa. Bahan yang biasanya digunakan untuk penggunaan *body armor* atau pakaian pelindung diri biasanya memiliki bahan poliamida seperti Kevlar®, dan Stabond® dan bahan polietilen seperti Spectra® dan Aristone®. Kedua bahan tersebut memiliki bahan kekauan tinggi, fleksibilitas yang tinggi. Khusus untuk jenis poliamida memiliki ketahanan panas yang tinggi dan pada bahan polietilen memiliki bahan yang kuat dan ringan.

Penggunaan bahan disesuaikan dengan kegunaan pakaian antipeluru (*body armor*), pada umumnya penggunaan bahan yang memiliki struktur padat yang mampu menyerap dan menyebarkan energi. Untuk meningkatkan fungsi dari pelindung tubuh maka diperlukan beberapa laipsan bahan. Misal, diperlukan 20-30 lapisan bahan kevlar untuk rompi anti peluru. Namun dengan bertambahnya lapisan tersebut membuat rompi tersebut memiliki penambahan berat benda sehingga mempengaruhi gerak dan kenyamanan pemakainya. Sehingga, perlu adanya pengembangan material yang lebih ringan dan lebih fleksibel sebagai bahan untuk *body armor* dengan kekuatan antipeluru yang tinggi namun tidak mengurangi efisiensi dan mobilitas pemakai. Salah satu cara pengembangannya adalah menggunakan *Magnetorheological Fluid* (MRF) sebagai bahan pelapis pada *body armor*.

MRF adalah salah satu dari *smart magnetic materials* yang memiliki karakter dapat bereaksi dengan medan magnet. MRF apabila diaplikasikan dalam medan magnet menunjukkan perubahan yang signifikan dan *reversible* dalam sifat rheologinya sebagai akibat dari perubahan dalam struktur mikro[3]. Hal itu yg disebut dengan efek *magnetorheological*, yaitu adanya peningkatan tegangan geser (*shear stress*) seiring dengan naiknya tegangan leleh variable magnetis. Karena sifat tersebut, MRF diaplikasikan pada *shock absorbers*, rem, peredam dan kopling. Sifat dari MRF yang mampu menyerap dan menghamburkan energi dalam area yang luas dengan memvariasikan

intensitas medan magnet sehingga muncul konsep penerapan MRF untuk *body armor*. Saat ini hanya beberapa literatur yang membahas penggunaan MRF sebagai lapisan komposit untuk pelapis[1][2].

Penerapan MRF masih terus dikembangkan dalam bidang teknik dan teknologi persenjataan. Dalam persenjataan, MRF dapat digunakan untuk konstruksi rompi anti peluru dan pelindung kendaraan lapis baja [4]. Rompi anti peluru dibuat dari lapisan bahan yang terbuat dari serat polimer aramid, seperti Kevlar, Twaron dan Spectra. Untuk meningkatkan kualitasnya, MRF dimasukkan ke dalam kantong plastik khusus yang ditempatkan diantara lapisan Kevlar. Dalam penyusunannya perlu diperhatikan dalam pengelasan Kevlar dengan kantong plastik yang harus memiliki ketahanan maksimum terhadap tusukan dan tembakan.

Pemilihan MRF sebagai alternatif daripada *graphene* dalam pengembangan *body armor* juga didasarkan pada pertimbangan berbagai faktor. Keunggulan utama MRF adalah kemampuannya untuk berubah warna secara dinamis ketika terkena energi elektromagnetik, seperti cahaya atau gelombang radio. Hal ini memungkinkan *body armor* yang dilengkapi dengan MRF untuk beradaptasi dengan cepat terhadap situasi yang berubah. Selain itu, MRF sering kali lebih ringan dan lebih fleksibel daripada material seperti *graphene* sehingga dapat meningkatkan kenyamanan pengguna dan fleksibilitas gerakan[5]. Keunggulan tambahan mencakup potensi perlindungan elektromagnetik dan sifat biodegradabilitas yang dapat lebih mempertimbangkan aspek keberlanjutan.

Pada jurnal ini akan dibahas tiga material yang menonjol dalam sorotan ilmiah dan industri pertahanan yaitu *Magnethoreologi Fluid (MRF)*, *Graphene*, dan Kevlar. Masing-masing dari ketiga material ini membawa karakteristik unik yang dapat memengaruhi kinerja dan kemampuan perlindungan yang diberikan oleh *body armor*. MRFs menawarkan fleksibilitas adaptif melalui respons terhadap medan magnet, sementara *graphene*, dengan kekuatan dan keuletannya yang luar biasa, menjanjikan perlindungan yang lebih ringan dan kuat[5]. Di sisi lain, Kevlar, yang telah lama digunakan dalam perlindungan pribadi, memiliki sejarah yang kuat dalam menahan penetrasi proyektil dan serangan tajam. Dalam upaya untuk mengoptimalkan perlindungan personal dan militer, perbandingan antara ketiga material ini menjadi semakin relevan. Dalam artikel ini, kita akan mengeksplorasi perbandingan kekuatan MRF, *Graphene*, dan Kevlar untuk *body armor*.

METODE

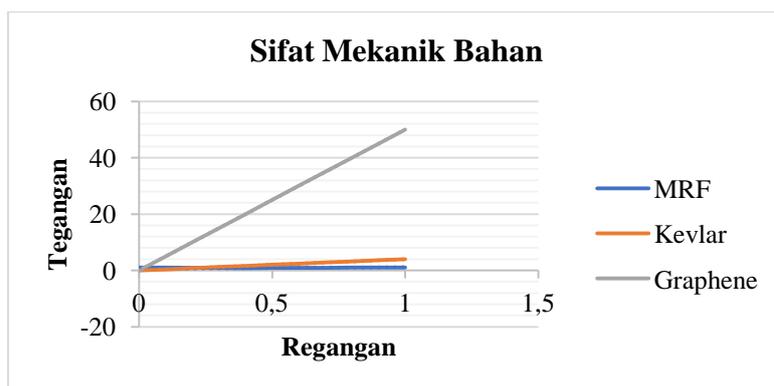
Metode penelitian ini fokus menggunakan metode *Literature Review* atau tinjauan pustaka. Metode *literature review* termasuk pendekatan sistematis untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan mensintesis literatur dan penelitian yang telah ada dalam suatu bidang tertentu. Tujuan utama dari metode ini adalah untuk memahami perkembangan pengetahuan yang telah ada, mengidentifikasi celah penelitian yang masih ada, dan memberikan dasar yang kuat untuk pembuatan jurnal baru. Untuk menjadi efektif, *literature review* harus relevan, *up-to-date*, dan informatif. Pendekatan untuk menemukan artikel yakni melalui *database* jurnal penelitian dengan menggunakan Google Scholar sebagai alat pencarian. Dalam rangka mencari artikel yang sesuai, digunakan kata kunci "*Magnethoreologi Fluid* untuk *body armor*" dalam proses pengumpulan data. *Literature Review* ini diringkas dengan metode naratif yang melibatkan pengelompokan data hasil ekstraksi yang memiliki kesamaan berdasarkan hasil pengukuran untuk memenuhi tujuan penelitian. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder, yang merupakan jenis data yang tidak diperoleh melalui pengamatan langsung atau pengumpulan data baru. Data sekunder diperoleh melalui pemanfaatan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti-peneliti pada periode sebelumnya.

HASIL

Penggunaan *Magnetorheological Fluid (MRF)* dalam *body armor* adalah inovasi yang menjanjikan dalam upaya meningkatkan perlindungan personal. Bahan-bahan yang digunakan untuk perbandingan efektivitas dengan material *MRFs* dari jurnal yang kami baca adalah

1. Kain yang memiliki bahan dari Kevlar®, Twaron® CT 709 WRT, Twaron® T 750[1], [2].
2. Bahan yang digunakan *MRFs* dengan campuran 3 bahan [1] yaitu

- ◆ →
- a) OM75.320.1A200 yang mengandung partikel besi $10\ \mu\text{m}$, oli sintetik OKS 325 dan stabilizer Areosil 200.
 - b) OM45+HQ20.100 yang mengandung partikel besi $10\ \mu\text{m}$ dan $1\ \mu\text{m}$, oli sintetik OKS 3760.
 - c) 132-DG LORD yang dikembangkan oleh LORD Corporation, Amerika Serikat, yaitu cairan yang membawa hidrokarbon.
3. *Graphene, Graphene Oxide (GO)*[6].
- a) Sifat Mekanik Bahan
 Nilai tegangan dan regangan dari bahan seperti *graphene*, kevlar, dan MRF memainkan peran penting dalam menentukan efektivitas body armor.



Gambar 1. Perbandingan tegangan dan regangan untuk mengetahui efektivitas bahan[2][6][8].

Tegangan dan regangan merupakan suatu hubungan yang saling berkaitan. Ketika suatu titik pada lapisan material mengalami tegangan maka regangan pada lokasi lain pada material tersebut akan mengalami regangan. Grafik 1 menunjukkan bahwa nilai tegangan terhadap regangan dari MRF, Kevlar, dan *graphene* berbanding lurus. Semakin tinggi regangan, semakin tinggi juga tegangan dari material meskipun ada di beberapa titik yang menjadi error perhitungan. Tegangan dan regangan material seperti MRF lebih kecil daripada bahan seperti *graphene* dan kevlar karena sifat-sifat mekanik dari bahan tersebut berbeda. Sifat mekanik dari sebuah bahan dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, termasuk struktur, komposisi kimia, dan interaksi antar atom atau molekul di dalam bahan tersebut. Material yang memiliki tegangan-regangan kecil (yang disebut sebagai material elastis) dapat dengan cepat menyesuaikan diri dengan tekanan yang diberikan, sehingga efektif dalam apabila dipakai sebagai bahan penyusun *body armor*. Keberhasilan material dalam uji seperti itu seringkali tergantung pada elastisitasnya dan kemampuannya untuk mempertahankan integritas struktural meskipun mengalami beban eksternal.

MRF adalah cairan yang dapat merespons terhadap medan magnet eksternal karena bahan ini adalah cairan yang dapat berubah bentuk dan viskositasnya ketika terpapar medan magnet, sehingga sifat mekaniknya terkait dengan respons terhadap medan magnet daripada kekuatan intrinsiknya. Sementara itu, *graphene* adalah struktur karbon yang sangat kuat dan kaku. Namun, kekurangannya terletak pada keterbatasan dalam menyerap energi dari benturan atau tekanan karena sifatnya yang cenderung kaku dan kurang elastis. Kevlar adalah serat sintesis yang terkenal karena kekuatannya. Sifat elastisitas yang baik memungkinkan Kevlar untuk mengalami deformasi sementara dan kembali ke bentuk semula setelah tekanan diberikan, sehingga mampu menyerap dan menyalurkan energi dari benturan atau serangan. Oleh karena itu, dalam kasus bahan seperti *graphene* dan kevlar, tegangan dan regangan yang dapat dihasilkan lebih tinggi karena struktur dan sifat mekanik dasar dari bahan-bahan tersebut.



Gambar 2. Ilustrasi *Body Armor* dari material MRF [9].

MRF menawarkan fleksibilitas dan adaptabilitas tinggi dalam *body armor*, dapat menyesuaikan diri dengan tingkat ancaman yang berbeda dengan cepat. *Graphene*, yang terdiri dari lembaran tipis atom karbon sangat kuat, adalah pilihan menarik untuk *body armor* karena kekuatannya dan keuletannya. Meskipun tipis, *graphene* memiliki kekuatan luar biasa, menjadikannya salah satu material terkuat yang diketahui. Penggunaan *graphene* dalam *body armor* menghasilkan perlindungan yang lebih ringan dan lebih kuat, meningkatkan mobilitas dan efektivitas. Sementara itu, Kevlar, serat sintesis yang memiliki kekuatan tinggi dan kemampuan menahan tarikan yang luar biasa, telah terbukti efektif dalam mengurangi risiko cedera akibat penetrasi proyektil dan serangan tajam. Penggunaan Kevlar dalam *body armor* adalah contoh nyata dari bagaimana bahan yang kuat dapat digunakan untuk memberikan perlindungan yang handal.

b) Uji Coba Penusukan

Perbandingan uji coba penusukan pada beberapa jenis MRF dan kevlar dalam berbagai perlakuan akan dilampirkan dalam tabel di bawah ini:

Tabel 1. Hasil ketahanan tusuk pada kain Twaron CT 709 WRT, Twaron T 750 dengan 2 kondisi, dan Kevlar Correctional-sampel hibrida dengan cairan LORD 132-DG[1].

No.	Deskripsi	Volume MRFs yang Diterapkan [cm ³]	Massa Permukaan Sistem Berlapis-lapis [g/m ²]	Ketebalan Sampel [mm]	Kedalaman Deformasi (Ddef) [mm]	Total Kedalaman Penetrasi [mm]	Keterangan
1.	22 Lapisan kain	0	4440	6.7	22	-	[A]
2.	Kantong dengan isi cairan 132DG-LRD yang berada di 11 lapisan kain	20	9158	6.8	15	-	[A]
3.	Kantong dengan isi cairan OM45+HQ30.100 yang berada di 11 lapisan kain	20	9242	6.9	16	-	[A]
4.	Kantong dengan isi cairan OM75.320.1A200 yang berada di 11 lapisan kain	20	8441	6.9	15	-	[A]
5.	8 Lapisan kain	0	3670	-	26	26	[B]
6.	Kantong berisi MRFs yang diletakkan dibawah 8 lapisan kain	20	8000	-	26	30	[B]
7.	Kantong berisi MRFs yang diletakkan diantara 6 lapisan kain dan 2 lapisan kain	20	8509	-	21	23	[B]
8.	Kantong berisi MRFs yang diletakkan diantara 2 lapisan kain dan 6 lapisan kain	20	8274	-	20	34	[B]
9.	24 Lapisan kain Kevlar Correctional	0	3175	4.4	24	24	[C]
10.	24 lapisan kain Kevlar Correctional dengan MRFs	27	11672	6.7	9	23	[C]
11.	24 lapisan kain Kevlar Correctional dengan MRFs diantara lapisan	20	8405	4.6	20	20	[C]
12.	13 lapisan kain Kevlar Correctional, 18 lapisan Dyneema, busa polyurethane diredam dengan MRFs diantara lapisan	13	9060	19.2	12	12	[C]
13.	10 Lapis kain Kevlar Correctional, 8 lapis kain Twaron T-750 dengan MRFs	18	10518	9.8	15	15	[C]
14.	8 lapis Kevlar XP	-	6194	8.8	19	-	[D]
15.	14 lapisan kain dengan cairan LORD 132-DG	-	16334	14.0	11	-	[D]
16.	10 lapisan kain dengan cairan LORD 132-DG	-	10882	10.0	18	-	[D]
17.	14 lapisan kain dengan cairan OM45+HQ30.100	-	11777	12.0	13	-	[D]
18.	14 lapisan kain dengan cairan OM75.320.1A200	-	11438	10.0	13	-	[D]

Keterangan:

- [A]: Hasil ketahanan tusuk pada kain Twaron CT 709 WRT dengan atau tanpa kantong berisi
 [B]: Hasil ketahanan tusuk pada kain Twaron T 750 dengan atau tanpa kantong berisi cairan LORD 132-DG
 [C]: Hasil ketahanan tusuk pada kain *Kevlar Correctional* dan sampel hibrida dengan cairan LORD 132-DG
 [D]: Hasil ketahanan tusuk pada kain Twaron T 750 dengan atau tanpa impregnasi MFRs dan sistem multi lapisan akhir, dengan sampel tersusun dari jumlah minimum lapisan untuk perlindungan terhadap benturan pisau.

Pada tabel 1-A, menunjukkan ketahanan tusukan pada lapisan Twaron CT 709 WRT dengan MRF diletakkan pada kantong plastik. Pada pengujian system multilayer yang terdiri dari 22 lapisan kain dan kantong berisi 20 cm³ dari setiap MRF yang diletakkan di antaranya. Selama uji ketahanan tusuk tidak tertembus oleh pisau. Pada lapisan tanpa MRF memiliki nilai kedalaman deformasi lebih tinggi dibanding dengan lapisan dengan ketiga MRF. Lapisan yang menggunakan MRF, meskipun berbeda jenis memiliki ketahanan yang hampir sama.

Pada tabel 1-B, menunjukkan ketahanan tusukan pada lapisan Twaron T 750 dengan atau tanpa MRF jenis LORD 132-DG. Pada tabel ini, ditunjukkan bahwa posisi dari kantong yang berisi MRF berpengaruh terhadap kedalaman penetrasi dari pisau pada lapisan yang diuji. Nilai kedalaman penetrasi paling rendah yaitu pada tabel 3 dengan no sampel 12, dimana artinya merupakan lapisan paling kuat pada tabel ini.

Pada tabel 1-C, menunjukkan ketahanan tusukan pada lapisan kain Kevlar Correctional dan sampel hibrida dengan MRF jenis LORD 132-DG. Pada sampel no 15 dan 16 memiliki nilai penetrasi hampir sama. Pada sampel no 17 dan 18 merupakan sistem - hibrida *multilayer* dimana terdiri dari Kevlar Correctional dan Dyneema SB 21. Nilai penetrasi paling kecil adalah pada sampel no 17 namun memiliki kelemahan yaitu terlalu banyak lapisan yang digunakan sehingga ketebalan yang tinggi. Pada akhirnya, sampel no 18 merupakan sampel yang terbaik dan optimal dengan nilai penetrasi rendah dan ketebalan sampel rendah.

Pada tabel 1-D, menunjukkan ketahanan tusukan dari lapisan Twaron T750 dengan ketiga jenis MFR diatas. Pada uji ketahanan tusuk, pisau tidak menusuk sampel yang diuji. Sampel dengan 14 lapisan Twaron T750 dengan MFR memiliki kedalaman deformasi lebih rendah dibanding dengan sampel tanpa MFR. Kerugian dari penggunaan *multilayer* yang diuji dengan kandungan MRF yaitu memiliki massa dan ketebalan yang besar dibandingkan dengan tanpa kandung MRF.

Kevlar adalah serat sintesis kuat yang umumnya digunakan dalam *body armor* untuk melindungi dari tusukan atau penetrasi. Dalam uji penusukan Kevlar, penting untuk memahami bagaimana serat ini merespon saat ditusuk, dengan memperhatikan tegangan dan regangan yang terjadi akibat tusukan. Data pada Tabel 1 membantu menilai efektivitas Kevlar dalam mencegah penetrasi. Dalam uji penusukan, tegangan terkait dengan tekanan diperlukan untuk menembus fluida, sementara regangan terkait dengan perubahan viskositas atau konsistensi dibutuhkan saat tindakan penusukan terjadi.

c) Uji Coba Penembakan

Setelah proyektil menabrak target, terjadi deformasi pada target dan menghasilkan area yang berbentuk kerucut akibat perambatan gelombang transversal. Pada tumbukan balistik, energi kinetik diserap sehingga membentuk kerucut yang bergerak, kegagalan pemasangan benang primer dalam kain, deformasi elastis pada benang sekunder, gaya geser dan gesek pada persilangan benang dan energi interaksi antar lapis selama penetrasi [1], [2]. Sehingga energi total proyektil yang diserap oleh target digambarkan sebagai

$$E_{total} = E_{KE} + E_{TF} + E_D + E_{SP} + E_F \quad (1)$$

Penggabungan MRF menyebabkan dirinya mengalami penyerapan energi berupa redaman viskositas sehingga menjadi

$$E_{total} = E_{KE} + E_{TF} + E_D + E_{SP} + E_F + E_{MFR \text{ damping}} \quad (2)$$

Ketentuan kedalaman deformasi yang dapat diterima adalah sebesar 40 mm. Pada sampel lapisan Kevlar dan Dyneema tanpa MFR, tidak mencapai tingkat ketahanan balistik yang berlaku. Pada struktur lapisan dengan MFR menunjukkan pengurangan 30% kedalaman deformasi jika dibandingkan dengan tanpa MFR. Penerapan MFR pada struktur material berkekuatan tinggi menyebabkan peningkatan dua kali lipat pada berat target keseluruhan.

Tabel 2. Hasil lapisan retakan untuk target yang diselediki setelah pengujian balistik di bawah medan magnet 159 kA/m dengan kaliber 9 mm proyektil Parabellum dan kecepatan 360 m/s[2].

No.	Struktur Sampel	Kepadatan Area Sampel [g/m^2]	Berat Cairan MRFs [g]	Medan Magnet [kA/m]	Jumlah Lapisan yang Retak
1.	8 lapis Kevlar XP	4473	-	0	3
2.	6 lapis Kevlar XP/ MRF/ 2 lapis Kevlar XP	9776	51.36	159	3
3.	8 lapis Dyneema SB/3 lapis Kevlar XP	3540	-	0	3
4.	8 lapis Dyneema SB/ MRF/ 3 lapis Kevlar XP	7876	43.36	159	3

d) Uji Tarik

Graphene adalah bahan lain dari teknologi nano karbon, juga dikenal sebagai salah satu bahan terkuat dalam beberapa tahun terakhir. *Graphene* diketahui memiliki modulus Young teoritis 1,0 TPa dan kekuatan 125 GPa dengan lembaran isotropik 2D dengan tebal 0.335 nm; kecepatan penetrasi 2x lipat dari kain tenun dengan sifat tarik yang sama; dan kecepatan gelombang tarik *graphene* dalam bidang sekitar $21.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, jauh lebih tinggi dari berlian yaitu $17.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ [6]. Energi penetrasi *graphene* juga 10 kali lebih tinggi daripada lembaran baja makroskopis. Oleh karena itu, *graphene* sedang dalam tahap penelitian lebih lanjut untuk *body armor* di masa depan.

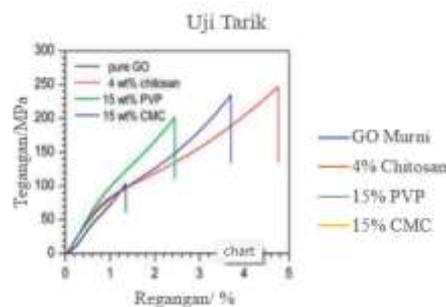
Graphene dan Graphene Oxide (GO) adalah material yang sangat menjanjikan dalam pengembangan *body armor* yang canggih. *Graphene*, sebagai lapisan karbon satu atom tebal, menonjol dengan kekuatan mekanik yang luar biasa dan konduktivitas termal serta listrik yang tinggi. Uji tarik adalah salah satu metode utama yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan mekanik *graphene*. Hasil uji tarik ini membantu memahami sejauh mana *graphene* mampu menahan tekanan atau tarikan dalam berbagai kondisi penggunaan *body armor*.

Graphene Oxide (GO) adalah turunan dari *graphene* yang memiliki oksigen terikat pada lapisan karbon. GO memiliki sifat dispersi yang baik dalam larutan, yang membuatnya cocok untuk digunakan dalam pembuatan film tipis atau komposit. Uji tarik pada GO adalah metode penting untuk mengukur kekuatan mekaniknya, yang berperan dalam menentukan sejauh mana GO dapat berperilaku sebagai pelindung tubuh yang efektif. Analisis struktur kimia dan uji konduktivitas elektrik juga digunakan untuk karakterisasi GO dalam konteks penggunaannya sebagai *body armor*.

Keuntungan dari *graphene* adalah isotropi mekanis dalam bidang (2D) dan kemampuannya untuk membentuk diri sendiri pada susunan *multilayer* paralel sehingga menguntungkan untuk membuat sistem struktural seperti nacre. Namun, hingga saat ini pembuatan *body armor* berbasis *graphene* dan turunannya masih sangatlah jarang

ditemukan karena material ini masih dalam penelitian dan dalam pembentukannya melibatkan proses sintesis yang relatif rumit dan memakan waktu.

Metode Hummers dapat dilakukan untuk mensintesis grafit menjadi *graphene* yaitu dengan mengubah grafit menjadi GO. Kemudian, GO direduksi untuk menghasilkan serbuk *graphene* murni [10]. Perubahan jumlah konsentrasi *graphene* dan polimer yang digunakan dapat mempengaruhi waktu homogenisasi material komposit, kekuatan, dan karakteristik mekanik dari bahan campuran tersebut. Polimer jenis poliuretan, dari segi sifat mekaniknya, memiliki kemampuan untuk tahan terhadap penyobekan, tahan terhadap benturan, dan dapat bertahan pada suhu tinggi tanpa mengalami degradasi. Ketika kita menambahkan 0,5% *graphene* ke dalam campuran *graphene*-poliuretan, didapatkan peningkatan sebesar 40% dalam kekuatan tarik dibandingkan dengan poliuretan murni [11]. Berikut merupakan grafik perbandingan tegangan terhadap regangan material GO murni dan beberapa material lain:



Gambar 3. Perbandingan tegangan dan regangan untuk mengetahui kekuatan tarik suatu material [7]

Dari grafik 2 dapat dilihat bahwa GO murni memiliki sifat mekanik yang luar biasa, dengan kekuatan yang sangat tinggi dan elastisitas yang baik. Kurva tegangan-regangan GO murni dengan kekuatan tarik 100 Mpa cenderung menunjukkan puncak tegangan dan regangan yang signifikan sebelum mencapai titik kegagalan. Ini memberikan keunggulan besar dalam hal menahan tekanan dan dampak, membuatnya menjadi pilihan yang baik untuk body armor yang ringan namun kuat. Selanjutnya, 4% Chitosan, sebagai polimer alami, dapat memberikan perlindungan yang baik terhadap benturan karena sifat elastisitasnya yang layak. Namun, kemampuannya dalam menahan tekanan dan dampak mungkin tidak sekuat bahan lain yang lebih kaku seperti *graphene*. Dalam kurva tegangan-regangan, kekuatan tariknya mencapai >200MPa yang menunjukkan elastisitas yang baik namun dengan batasan pada kekuatan absolutnya. Kurva tegangan-regangan untuk 15% PVP mungkin menunjukkan elastisitas yang baik dengan kekuatan tarik 200 MPa, namun tidak sekuat GO murni. Terakhir, kurva tegangan-regangan untuk 15% CMC akan menunjukkan elastisitas yang cukup baik dengan kekuatan tarik >200MPa seperti 4% Chitosan. Namun demikian, sifat mekanik material ini masih tidak sekuat GO murni.

Grafik 2 juga menunjukkan bahwa semakin rendah nilai tegangan yang diperlukan untuk mencapai suatu regangan tertentu, semakin efisien atau kuat suatu material dalam menahan tekanan atau beban. Jadi, jika GO murni memiliki nilai tegangan-regangan yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan lain seperti 4% Chitosan, 15% PVP, dan 15% CMC ini menunjukkan bahwa GO murni memiliki sifat mekanik yang lebih baik atau lebih efisien dalam menahan tekanan atau beban. Hal tersebut bisa disebabkan karena struktur dan sifat kimia dari masing-masing bahan. GO murni memiliki struktur lapisan tipis karbon yang kuat dan fleksibel, yang dapat memberikan sifat mekanik yang baik. Sementara itu, material lain seperti 4% Chitosan, 15% PVP, dan 15% CMC mungkin memiliki struktur atau sifat kimia yang membuatnya lebih rentan terhadap deformasi atau tegangan.

KESIMPULAN

Dari pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa penggunaan *smart material Magnetorheological Fluid* sangat berpengaruh apabila digunakan pada *body armor*. Pada uji coba penusukan penggunaan lapisan kain dari Kevlar dan Twaron dimana dua lapisan tersebut dicampur dengan MRF merupakan lapisan paling baik dalam penggunaan *body armor*. Pada uji coba penembakan, penggunaan lapisan dari Kevlar XP dengan diantaranya adalah MRF merupakan lapisan paling baik dalam *body armor*. Pada uji tarik, penggunaan *graphene* untuk *body armor* masih dalam tahap penelitian.

Meskipun *graphene* dan Kevlar memiliki sifat mekanik yang luar biasa, tantangan produksi dan keterbatasan dalam adaptabilitasnya membuat MRF menjadi alternatif yang lebih menarik terhadap perubahan situasi dan mobilitas yang diperlukan. Namun, tetap diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan penggunaan *smart material Magnetorheological Fluid* sebagai bahan pelapis bagi *body armor*.

Saran

Saran penting dalam penelitian ini yakni untuk mendalami karakteristik material *Magnetoreologi Fluid* (MRF), termasuk viskositas, daya tahan terhadap suhu ekstrem, dan respons terhadap medan magnet. Desain dan fabrikasi *body armor* yang memungkinkan integrasi optimal MRF menjadi esensial, dengan fokus pada struktur yang tidak mengurangi fleksibilitas atau mobilitas penggunaannya. Uji performa MRF perlu dilakukan untuk memahami bagaimana medan magnet memengaruhi sifat-sifat cairan tersebut dan sejauh mana perubahan tersebut dapat memberikan peningkatan perlindungan. Studi keamanan dan kesehatan harus menjadi fokus, mencakup penilaian dampak terhadap kesehatan pengguna dan identifikasi langkah-langkah untuk meminimalkan risiko. Optimalisasi formulasi MRF untuk mencapai performa maksimal dan evaluasi aspek ekonomi serta keterjangkauan teknologi juga diperlukan. Penelitian ini bukan hanya membuka jalan bagi pengembangan perlindungan pribadi yang lebih canggih tetapi juga menggambarkan peran penting teknologi inovatif dalam meningkatkan keamanan individu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Olszewska *et al.*, "Textile Multilayered Systems with Magnetorheological Fluids for Potential Application in Multi-Threat Protections. Preliminary Stab-Resistance Studies. FIBRES & TEXTILES in Eastern," 2013.
- [2] J. Kozłowska and M. Leonowicz, "MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS AS A PROSPECTIVE COMPONENT OF COMPOSITE ARMOURS," *composite Theory and Practice*, vol. 13, no. 4, pp. 227–231, 2013.
- [3] G. Yun *et al.*, "Liquid metal-filled magnetorheological elastomer with positive piezoconductivity," *Nat Commun*, vol. 10, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09325-4.
- [4] S. S. Kang, K. Choi, J. Do Nam, and H. J. Choi, "Magnetorheological elastomers: Fabrication, characteristics, and applications," *Materials*, vol. 13, no. 20. MDPI AG, pp. 1–24, Oct. 02, 2020. doi: 10.3390/ma13204597.
- [5] J. Naveen *et al.*, "Advancement in graphene-based materials and their nacre inspired composites for armour applications—A review," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 5. MDPI AG, May 01, 2021. doi: 10.3390/nano11051239.
- [6] Z. Benzait and L. Trabzon, "A review of recent research on materials used in polymer–matrix composites for body armor application," *Journal of Composite Materials*, vol. 52, no. 23. SAGE Publications Ltd, pp. 3241–3263, Sep. 01, 2018. doi: 10.1177/0021998318764002.
- [7] S. N. Raja *et al.*, "Strain-dependent dynamic mechanical properties of Kevlar to failure: Structural correlations and comparisons to other polymers," *Mater Today Commun*, vol. 2, pp. e33–e37, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.mtcomm.2014.11.002.

- [8] A. D. Putra, D. I. Tsamroh, and B. C. Tjiptady, "Analysis of Energy Absorption of Soft Body Armor with Experimental Method and Finite Element Method Using STF (Shear Thickening Fluid) Composite Material," *Jurnal Transmisi*, vol. 19, no. 2, pp. 92–97, 2023, doi: 10.26905/jtmt.v19i2.10248.
- [9] Shin Ching-Yan, "Sanming XuanliShenqing," *Shenqing Publication*, 2006.
- [10] S. Pranoto, "SINTESIS DAN KARAKTERISASI GRAFENA – POLIURETAN SERTA POTENSINYA SEBAGAI MATERIAL ROMPI ANTI PELURU," *SINTESIS DAN KARAKTERISASI GRAFENA - POLIURETAN SERTA POTENSINYA SEBAGAI MATERIAL ROMPI ANTI PELURU*, pp. 1–38, 2021
- [11] G. Singh *et al.*, "Effect of ammonia plasma treatment on graphene oxide LB monolayers," in *AIP Conference Proceedings*, 2013, pp. 702–703. doi: 10.1063/1.4791231.
- [12] T. J. Kang, K. H. Hong, and H. Jeong, "Preparation and properties of a p-aramid fabric composite impregnated with a magnetorheological fluid for body armor applications," *Polym Eng Sci*, vol. 55, no. 4, pp. 729–734, Apr. 2015, doi: 10.1002/pen.23826.
- [13] E. P. Fahrenthold, M. D. Bryant, M. D. Driga, M. F. Hamilton, and R. G. Longoria, "Impact Dynamics of Magnetorheological Fluid Saturated Kevlar and Magnetostrictive Composite Coated Kevlar Committee."
- [14] R. S. Underhill, "THE MULTIFUNCTIONAL MATERIALS NEEDS OF THE FUTURE DISMOUNTED SOLDIER." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/237831957>
- [15] Paul, "Soft Body Armor: An Overview of Materials, Manufacturing, Testing, and Ballistic Impact Dynamics." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267725942>
- [16] N. K. Naik and P. Shirao, "Composite structures under ballistic impact," *Compos Struct*, vol. 66, no. 1–4, pp. 579–590, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.05.006.