



## Komposit Polimer Sebagai Material Tahan Balistik

### *Polymer composite as ballistic-resistant material*

Mardiyati<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kelompok Keahlian Ilmu dan Teknik Material  
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung,  
Jalan Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia  
E-mail: mardiyati@material.itb.ac.id

**Abstrak.** Penggunaan material komposit polimer dalam bidang militer sangat luas. Review ini memberikan wawasan tentang material komposit polimer serta aplikasinya dalam bidang pertahanan, terutama untuk aplikasi di bidang balistik. Secara umum, keperluan militer yang membutuhkan material dengan ketahanan balistik yang baik dapat dibagi menjadi tiga kategori, yakni pakaian, helm, kendaraan dan penguat struktural. Pemanfaatan material komposit pada aplikasi militer terbukti dapat memberikan performa yang lebih baik dibandingkan dengan material logam terutama dalam meningkatkan kemampuan mobilitas dari personil pertahanan.

**Kata Kunci:** balistik, komposit, polimer, militer, pertahanan

*Abstract. The usage of polymer composite material in military field is very wide. This review gives insight about the application of polymer composite in defence field, mainly for ballistic application. In general, the military needs which require materials with a good ballistic performance can be divided into three categories, which are clothes, helmet, vehicle and structural enforcement. The utilization of composite material on military application has been proven have better performances as compared to metal materials, especially in upgrading the mobility of defence personnel.*

*Keywords: ballistic, composite, polymer, military, defence*

## 1 Pendahuluan

Bahan komposit banyak digunakan di beberapa industri seperti industri otomotif, kedirgantaraan, kelautan dan infrastruktur. Material komposit juga telah digunakan secara luas untuk aplikasi dalam bidang militer [1]. Faktor pendorong utama dalam penggunaan bahan komposit adalah densitasnya yang rendah, sifat mekanik spesifik yang tinggi, kinerja yang sebanding dengan logam, tahan terhadap korosi dan mudah untuk difabrikasi [2]. Saat ini, perlengkapan militer yang dapat melindungi diri personil pertahanan dari senjata musuh namun tetap dapat mempertahankan tingkat mobilitas personil pertahanan menjadi kebutuhan yang sangat penting.

Selama beberapa tahun terakhir, teknologi senjata telah menjadi jauh lebih canggih. Hal tersebut menyebabkan performa perlengkapan perlindungan yang dibutuhkan juga menjadi lebih tinggi. Namun, pembuatan perlengkapan perlindungan yang lebih canggih menyebabkan perlengkapan perlindungan menjadi semakin berat dan tidak praktis sehingga dapat mengganggu mobilitas personil pertahanan [3, 4].

Saat ini, sistem perlengkapan perlindungan mengandalkan berbagai bahan komposit polimer untuk memberikan perlindungan balistik yang sangat baik. Selain itu, pemanfaatan material komposit dalam pembuatan peralatan militer membuat peralatan militer menjadi lebih ringan

sehingga dapat meningkatkan mobilitas dari personel pertahanan maupun kendaraan pertahanan[5,6].

## **2 Komposit Polimer**

### **2.1 Definisi**

Material komposit adalah bahan struktural yang terdiri dari dua atau lebih bahan yang digabungkan pada tingkat makroskopik dan tidak larut satu sama lain [7]. Komposit merupakan sistem multi fasa yang tersusun atas bahan matriks dan bahan penguat. Bahan matriks adalah fase kontinu dan penguat merupakan fase terdispersi. Bahan penguat dapat berupa serat, partikel atau serpihan. Komposit dengan matriks polimer merupakan material yang menggunakan polimer sebagai matriks dan serat sebagai penguat. Serat yang umum digunakan dalam material komposit polimer berpenguat serat adalah serat gelas, serat karbon dan serat organik lainnya. Biasanya, kekuatan dan kekakuan serat yang digunakan jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kekuatan dan kekakuan matriks. Bahan matriks harus memiliki sifat adhesive yang baik terhadap serat sehingga mampu mengikat serat secara kuat dan mampu mentransfer beban yang diterima komposit kepada serat. Pada material komposit, performa dari matriks, performa serat serta sifat antara muka antara matriks dan serat akan memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap sifat dari material komposit.

### **2.2 Matriks**

Matriks polimer yang biasanya digunakan untuk aplikasi dalam bidang militer dapat berupa resin termoset dan resin termoplastik.

Resin termoset yang paling umum digunakan dalam komposit balistik adalah fenolik, epoksi, vinilester, dan poliester. Resin fenolik sering dipilih karena sifatnya yang tahan api, tahan terhadap cairan dan bahan kimia, kekakuannya yang tinggi, serta efisiensi balistiknya yang baik apabila dikombinasikan dengan serat gelas dan aramid. Resin epoksi dipilih karena sifat mekanik dan termalnya yang tinggi, ketangguhan yang baik, ketahanan air dan ketahanan termal yang baik, tingkat penyusutan yang rendah, serta mudah untuk difabrikasi. Vinilesters menawarkan perpaduan antara sifat mekanik yang baik dan kemudahan dalam proses fabrikasi.

Resin termoplastik yang umum digunakan dalam proses pembuatan prepreg termoplastik balistik antara lain elastomer karet, poliuretan, polietilen, akrilik, atau campuran dari beberapa resin. Poliuretan menawarkan sifat mekanik yang baik, ketahanan terhadap termal yang baik, serta resiko kegagalan delaminasi yang lebih rendah ketika terkena beban impak. Elastomer karet cenderung memiliki sifat mekanik yang paling rendah, resiko kegagalan delaminasi yang paling tinggi, namun memiliki kemampuan menyerap energi potensial yang paling tinggi dibandingkan dengan jenis resin termoplastik lainnya. Resin polietilena sering digunakan dalam pembuatan prepeg termoplastik balistik karena dapat dibuat menjadi film yang memiliki densitas rendah. Resin berbasis film lebih mudah dan lebih murah untuk digunakan daripada resin dalam bentuk cairan, tetapi resin ini tidak mengelilingi dan membasahi serat dengan baik sehingga terkadang memberikan performa yang kurang baik. Serat tenun atau serat searah yang memanfaatkan matriks dalam bentuk film biasanya dibuat dengan melelehkan film ke dalam serat. Dengan proses tekan panas film terikat dengan serat dan membentuk prepreg laminasi film termoplastik.

### 2.3 Penguat

Sistem proteksi balistik telah digunakan sejak zaman dahulu. Pada awalnya, material yang keras dan rigid digunakan untuk menahan penetrasi dan beban impak. Namun, seiring dengan berjalannya waktu dan berubahnya jenis ancaman senjata, konsep proteksi balistikpun ikut berubah. Terlebih setelah ditemukannya serat tekstil, sistem proteksi balistik yang lebih baik dapat dikembangkan.

Serat tekstil yang banyak digunakan selama Perang Dunia II untuk sistem proteksi balistik adalah nilon. Nilon memiliki ketahanan yang tinggi terhadap *rupture*. Seiring dengan berjalannya waktu, dipahami bahwa bila hanya menggunakan serat dengan ketahanan terhadap *rupture* yang tinggi atau ketangguhan yang tinggi tidak akan memberikan perlindungan balistik yang lebih baik. Sistem proteksi balistik adalah fenomena kompleks yang melibatkan struktur yang halus, perambatan gelombang, dan sifat tarik.

Serat para-aramid mulai dipasarkan sekitar tahun 1970an. Serat para-aramid ini memiliki kekuatan lima kali lebih tinggi dibandingkan baja dan memiliki performa balistik yang lebih superior dibandingkan dengan nilon. Dalam beberapa tahun terakhir, serat polietilena dengan berat molekul sangat tinggi (*Ultrahigh molecular weight polyethylene*, UHMWPE) juga mulai digunakan untuk aplikasi balistik karena memiliki keunggulan dalam beberapa sifat tertentu.

Terdapat tiga serat utama yang umum digunakan dalam pembuatan balistik armor, yaitu serat gelas, serat aramid, dan serat polietilena dengan berat molekul sangat tinggi (UHMWPE).

Persyaratan untuk serat yang diaplikasikan sebagai balistik antara lain yaitu kekakuan yang tinggi, *tenacity* yang tinggi, memiliki ketahanan terhadap bahan kimia yang baik terutama ketahanan kimia terhadap pelarut atau pelubrican yang digunakan dalam industri otomotif dan dirgantara, elongasi saat putus yang rendah, nyaman untuk dipakai serta harga yang efektif dalam proses pembuatannya.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa upaya pengembangan armor berjalan semakin cepat sejak ditemukannya serat polimer tipe *rod* yang rigid yaitu p-aramid oleh DuPont, Inc., pada tahun 1970an dengan nama dagang kevlar®. Dengan ditemukannya teknologi pembuatan serat *gel-spun high-modulus polyethylene* (HMPE) yang dikomersilkan oleh by Honeywell (Allied

Fibers), serat p-aramid dan serat UHMWPE ini banyak digunakan diseluruh dunia untuk memproduksi kain balistik. **Gambar 1.** menunjukkan jenis kain prepreg serat gelas, kain kevlar dan kain UHMWPE.



**Gambar 1.** (a) prepreg serat gelas untuk aplikasi armor [9] (b) kain kevlar (c) kain UHMWPE [25]

Komposit hard armor yang dibuat dari p-aramid dan UHMWPE membuat armor menjadi lebih ringan dan menjadi tulang punggung dalam proses pembuatan *hard armor* modern.

Kain balistik berkinerja tinggi lainnya seperti Spectra® (oleh Honeywell); Dyneema® (oleh DSM) dan Technora® (oleh TeijinAramid), terbuat dari serat UHMWPE; sedangkan Zylon®

(oleh Toyobo) dan Vectran® (oleh Celanese Corporation), diproduksi dengan menggunakan serat *liquid crystal polymer* [8].

### 3 Aplikasi Komposit Polimer dalam Bidang Militer

Secara umum, keperluan militer yang membutuhkan material dengan ketahanan balistik yang baik dapat dibagi menjadi tiga kategori, yakni pakaian, helm, kendaraan dan penguat struktural [9].

#### 3.1 *Body armor*

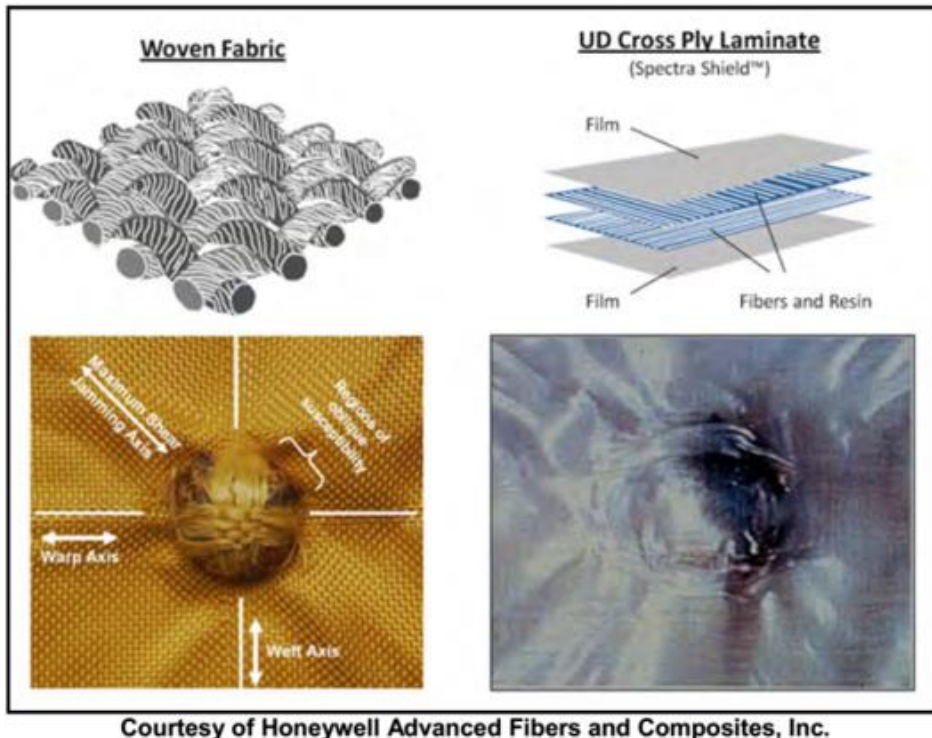
*Body armor* didefinisikan sebagai suatu pelindung defensif yang dipakai untuk melindungi tubuh dari serangan fisik [10]. *Body armor* yang dipakai harus nyaman digunakan, tidak berat, tidak menghambat mobilitas, serta memberi ruang yang cukup untuk bernafas terutama untuk pemakaian yang lama dan pada temperatur yang cukup tinggi. *Body armor* seringkali digunakan untuk melindungi personil pertahanan terhadap fragmen pecahan peluru dan bom. Dalam peperangan modern saat ini, fragmen yang berasal dari amunisi konvensional (misalnya, peluru artileri, granat, mortir) atau dari *improvised explosive devices* (IEDs) menjadi penyebab utama cedera yang dialami oleh personil pertahanan [11-14]. Pada bulan Oktober 2013, berdasarkan data yang dilaporkan oleh organisasi iCasualties mengemukakan bahwa dari 3383 korban jiwa, 1341 disebabkan oleh IED dan 384 karena fragmen tembakan senjata api [15].

Perlindungan dari senjata militer caliber kecil cukup menantang dalam banyak kasus karena kecepatan peluru yang tinggi, aspek rasio yang rendah dan permukaan keras proyektil. Faktor pertimbangan utama dalam menentukan desain *body armor* adalah jenis tipe ancaman dan perlindungan yang dibutuhkan (balistik, fragmen, ledakan, tusukan, kimia, api, dll.). *Armor* yang didesain untuk perlindungan terhadap satu jenis ancaman mungkin tidak cocok untuk jenis ancaman yang lain. Misalnya, tekstil yang dirancang untuk perlindungan balistik membutuhkan mobilitas benang yang cukup fleksible untuk menghindari kegagalan dini akibat beban impak. Namun jenis tekstil ini tidak akan berkinerja baik untuk perlindungan terhadap tusukan. Tekstil yang dirancang untuk ketahanan tusuk membutuhkan tenunan yang padat untuk mencegah benang terdorong kesamping akibat ujung benda tajam seperti pisau dan jarum. Tenunan padat yang digunakan untuk menahan tusukan dapat mengalami kegagalan dini akibat beban impak balistik.

Nilon merupakan serat tahan balistik yang banyak digunakan selama Perang Dunia ke II karena memiliki sifat mekanik spesifik yang tinggi dan dapat dibuat beberapa lapis untuk menangkap fragmen pecahan peluru dari proyektil dan perangkat peledak. Seiring kemajuan ilmu polimer, serat seperti poliamida dan polietilena dengan berat molekul sangat tinggi dikembangkan untuk aplikasi tahan balistik. Perlindungan yang ditawarkan per satuan berat material meningkat pesat, serta struktur seperti ini memberikan kenyamanan lebih tinggi. Serat nilon sudah tidak digunakan lagi saat ini, karena serat modern menawarkan performa yang jauh lebih superior.

Secara tradisional, *soft body armor* untuk perlindungan balistik diproduksi dengan menggunakan lapisan kain *woven* yang dijahit bersama. Saat ini, laminasi juga ditumpuk dengan *nonwoven*, lapisan searah (UD) dan kombinasi laminasi *woven / nonwoven*. Pada laminasi UD, serat di dalam setiap lapisan UD tersusun dalam susunan paralel yang searah dan diperkuat dengan resin atau matriks polimer yang sesuai seperti Kraton yang akan mengikat serat. Lapisan UD diproduksi dalam bentuk lembaran yang sangat tipis dan ditumpuk, sebagai contoh misalnya dengan cara bergantian dalam arah  $0^\circ / 90^\circ$  seperti terlihat pada **Gambar 2**. Film

polietilen ditambahkan untuk melindungi lapisan, dan bentuk laminasi akhir dicapai dengan menerapkan panas dan tekanan.



Courtesy of Honeywell Advanced Fibers and Composites, Inc.

Gambar 2 Contoh dari kain tenun dan konstruksi laminat UD dan deformasi impak balistik [10]

Laminasi UD komersial yang digunakan untuk perlindungan balistik mencakup Honeywell's Spectra Shield (serat polietilena dengan berat ultrahigh (UHMWPE)) dan Gold Shield (serat Kevlar) 1 dan DSM's Dyneema (serat UHMWPE).

Standar baju balistik yang paling banyak digunakan adalah standar NIJ (National Institute of Justice) Amerika. Berdasarkan standar ini, baju balistik dibagi menjadi berapa level, yaitu level I, II-A, II, III A, III, dan IV. Level I adalah tingkatan terendah, baju hanya dapat menahan peluru berkaliber kecil [9].

Terdapat beberapa hasil penelitian mengenai aplikasi yang menjanjikan dalam penggunaan nanokomposit untuk body armor [16-19]. Fluida *shear thickening* (fluida yang mengandung partikel terdispersi) akan berubah menjadi kaku dan dapat menahan deformasi ketika diberikan beban kecepatan tinggi. Jika fluida *shear thickening* ini di impregnasi kedalam kevlar konvensional, maka kemampuan material untuk menyerap energi meningkat secara signifikan. Kinerja balistik empat lapisan kevlar yang diimpregnasi fluida *shear thickening* memiliki ketahanan balistik dua kali lebih tinggi dibandingkan dengan sepuluh lapisan kevlar yang tidak di impregnasi oleh fluida *shear thickening*. Material ini akan menghasilkan body armor yang lebih fleksibel dan ringan serta dapat diaplikasikan untuk body armor dimana fleksibilitas pergerakan diperlukan selain perlindungan terhadap senjata tumpul untuk lengan dan kaki.

### 3.2 Helm Balistik

Helm militer telah dimodifikasi selama berabad-abad sesuai dengan kebutuhan, termasuk tingkat perlindungan, kompatibilitas serta isu mobilitas [20 -24].

Secara historis, helm balistik merupakan perlengkapan penting bagi militer. Selama Perang Dunia pertama dan kedua, para prajurit menggunakan helm yang terbuat dari baja. Helm ini hanya memberikan perlindungan terhadap beban dampak dengan kecepatan rendah. Selama konflik di Vietnam, tentara Amerika mencoba menggunakan helm komposit yang ringan yang terbuat dari aramid dan resin polimer. Helm ini meningkatkan perlindungan balistik yang cukup baik. Dengan penelitian dan pengembangan yang dilakukan oleh militer Amerika, helm militer yang seluruhnya terbuat dari komposit diperkenalkan pada awal tahun 1980an. Helm ini terdiri dari prepreg kain aramid dan peforma balistiknya meningkat hingga dua kali lipat dibandingkan dengan helm yang terbuat dari baja. Dengan digunakannya kain dan serat HMPE, peforma helm mengalami peningkatan namun berat helm berkurang hingga 20%. Adanya teknologi *nonwoven* yang diaplikasikan pada semua serat balistik menyebabkan penurunan berat helm sebesar 10% dengan peforma yang sama. Saat ini, angkatan darat Amerika membeli helm generasi berikutnya, yang dapat memberikan perlindungan dari sejumlah ancaman seperti fragmen dan peluru FMJ (*full metal jacket*) 9 mm, dengan berat yang jauh lebih ringan daripada helm yang digunakan sebelumnya.

Angkatan bersenjata Inggris sebelumnya menggunakan helm Mk6. Pada tahun 2009 helm tersebut diganti dengan helm tempur Mk7 yang sedikit lebih ringan dibandingkan dengan helm Mk6. Helm Mk7 juga memiliki desain yang lebih nyaman daripada helm Mk6 dan memiliki pengikat dagu yang lebih baik untuk kestabilan. Perlindungan balistik Mk7 diukur dengan pengujian fragmen V50 dan kecepatan proteksi fragmen adalah 650 m/s.

Saat ini, Angkatan Darat Prancis menggunakan helm anti balistik Spectra. Nama spectra diambil dari namanya serat yang digunakan, berat helm spectra sekitar 1,4 Kg. Helm Spectra memiliki tingkat perlindungan V50 sebesar 680 m/s terhadap FSP 17 gram. Pasukan udara dan pasukan khusus Rusia menggunakan helm 6B7-1M yakni helm komposit dengan aramid sebagai penguat, sebagai perlengkapan tempurnya. Helm melindungi dari fragmen pada tingkat V50 minimal 630m/s dan dari peluru pistol dan dapat melindungi dari temperatur -50 hingga +50°C. Helm ini kompatibel dengan alat komunikasi, pengawasan dan target.

**Tabel 1.** menunjukkan helm balistik yang saat ini digunakan dengan tingkat perlindungan dan berat helm. Secara umum dapat disimpulkan bahwa helm balistik yang digunakan oleh militer di negara – negara Eropa saat ini menggunakan komposit yang memiliki bobot yang sangat ringan dengan perlindungan balistik yang tinggi, memiliki ruang dan arah jangkauan kepala yang lebih luas yang dilengkapi dengan perangkat komunikasi serta ventilasi yang baik.

**Tabel 1. Helm balistik komposit yang digunakan saat ini [9]**

Material	Peluru 9-mm FMJ (436 ± 9 m/s)	V <sub>50</sub> : 17-gr FSP
<b>Low-performance technology</b> (e.g. 3000-denier aramid fabric)	1350g	600 m/s
<b>Standard-performance technology</b> (1000-denier woven aramid fabric)	1250g	600 m/s

New technology (UHMWPE)	1000g	600 m/s
----------------------------	-------	---------

### 3.3 Kendaraan Darat Militer

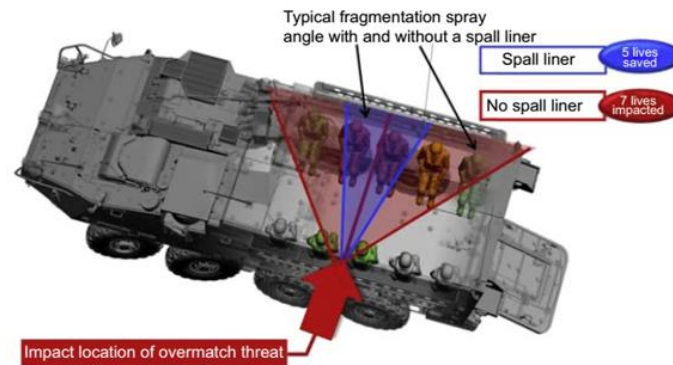
Saat ini, kendaraan militer yang dibuat dengan menggunakan material komposit berpenguat serat dapat mengurangi berat kendaraan, meningkatkan mobilitas, meningkatkan efisiensi bahan bakar, serta meningkatkan umur kendaraan. Berat kendaraan yang ringan memungkinkan kendaraan untuk dapat membawa lebih banyak bahan bakar, amunisi dan pasukan.

Kendaraan militer memainkan peran yang sangat penting dalam operasi militer dan pemeliharaan perdamaian. Banyak kendaraan militer yang membutuhkan proteksi armor, dimana jenis dan tingkat proteksi tergantung kepada jenis misinya. Kendaraan yang dirancang sebagai kendaraan tempur membutuhkan perlindungan dari peluru, pecahan peluru, ledakan eksplosif, rudal, dan ancaman lainnya. Kendaraan yang dirancang untuk tujuan taktis mungkin tidak memerlukan armor, dimana kendaraan tersebut beroperasi jauh dari api.

Tentara yang berada dalam lambung kendaraan darat dilindungi oleh perlengkapan armor yang menempel pada lambung kendaraan untuk meningkatkan survivabilitas. Didalam kendaraan darat, terdapat bahan tambahan yang tidak berkontribusi terhadap struktur kendaraan dan dapat ditemukan di bagian dalam maupun di luar kendaraan. Komposit yang digunakan tersebut dikenal dengan nama *spall liner*.

Spall liner adalah nama umum untuk soft material, yang biasanya terbuat dari laminasi serat aramid, serat gelas, atau *high density polyethylene* (HDPE), yang dipasang di kompartemen awak kendaraan, melapisi permukaan interior tank, kendaraan tempur, dan pengangkut personel yang berfungsi sebagai jenis pelindung interior. *Spall liner* berfungsi untuk mencegah fragmen (*spall*) yang dihasilkan selama peperangan mengenai personel pertahanan. *Spall liner* dapat digunakan sebagai pengaman tambahan jika sistem armor *overmatched*, yakni istilah yang digunakan saat proyektil yang masuk memiliki daya tembus lebih banyak daripada daya henti armor. **Gambar 3** memperlihatkan contoh *spall liner* yang menyelamatkan personel dalam *overmatched*. Dapat dilihat dalam gambar tersebut *spall liner* secara signifikan mengurangi penyebaran fragmentasi. Sangat penting untuk diperhatikan bahwa kemampuan *spall liner* untuk mengurangi sudut kerucut *spall* tergantung pada berat atau densitas areal *spall liner* dan material yang digunakan. Material komposit performa tinggi dapat mengurangi sudut kerucut *spall* dengan bobot yang lebih ringan.





Gambar 3 Ilustrasi penggunaan *spall liner* pada kendaraan militer dengan mengurangi penyebaran fragmentasi [9]

#### 4 Kesimpulan

Saat ini, material komposit polimer berpenguat serat mulai digunakan secara luas dalam aplikasi militer. Secara umum, keperluan militer yang membutuhkan material dengan ketahanan balistik yang baik dapat dibagi menjadi tiga kategori, yakni pakaian, helm, kendaraan dan penguat struktural. Pemanfaatan material komposit pada aplikasi militer terbukti dapat memberikan performa yang lebih baik dibandingkan dengan material logam terutama dalam meningkatkan kemampuan mobilitas dari personil pertahanan.

#### Referensi

- [1] P.K.Mallick. *Fiber-Reinforced Composites*. CRC Press Taylor & Francis Group. 2008, hal 24- 40.
- [2] Ru-Min Wang, Shui-Rong Zheng and Ya-Ping Zheng. *Polymer Matrix Composites and Technology*. Woodhead Publishing Limited and Science Press Limited, 2011, hal 6-9.
- [3] Laible, R.C., Barron, E., *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. 1980.
- [4] Roberts, J., Proceedings of Defense Components and Equipment Exhibition, Session 3. New Materials, London. 1985.
- [5] Dos Santos Alves, A.L., Nascimento, L.F.C., Suarez, J.C.M., Influence of weathering and gamma irradiation on the mechanical and ballistic behavior of UHMWPE composite armor. *Polymer Test* 24, 104e113. 2005.
- [6] Chabba, S., Es, M., Klinken, E.J., Jongedijk, M.J., Vanek, D., Gijsman, P., Waals, A.C.L.M., Accelerated aging study of ultra high molecular weight polyethylene yarn and unidirectional composites for ballistic applications. *Journal of Materials Science* 42,2891e2893. 2007.
- [7] Guru raja, M.N., Hari rao, A.N., *Effect of an angle-ply orientation on textile properties of kevlar/glass hybrid composites*. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering* 2 (3), 1. ISSN:2319-3182. 2013.
- [8] Ray, B.C. *Impact of environmental and experimental parameters on FRP composites*. In: Eighteenth International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM XVIII), pp. 12e14. 2009.



- [9] Ashok Bhatnagar. *Lightweight Ballistic Composites Military and Law-Enforcement Application*. Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier.2016.
- [10] Paul V. Cavallaro. Soft Body Armor: An overview of Materials, Manufacturing, Testing, and Ballistic Impact Dynamics. NUWC-NPT Technical Report 12, 057 1 August 2011.
- [11] Ryan, J.M., Cooper, G.J., Haywood, I.R., Milner, S.M. *Field surgery on a future conventional battlefield: strategy and wound management*. Annals of the Royal College of Surgeons of England 73 (1), 13e20. 1991.
- [12] Lewis, E.A., *Between Iraq and a hard plate: recent developments in UK military personal armour*. In: Personal Armour Systems Symposium 2006. The Royal Armouries, Leeds, UK. 2006.
- [13] Ramasamy, A., Clasper, J.C., Stewart, M.P.M., *Injuries from roadside improvised explosive devices*. The Journal of Trauma Injury, Infection, and Critical Care 65 (4), 910e914.2008.
- [14] Breeze, J., Gibbons, A.J., Shieff, C., Banfield, G., Bryant, D.G., Midwinter, M.J., *Combat-related craniofacial and cervical injuries: a 5-year review from the British military*. The Journal of Trauma Injury, Infection, and Critical Care.2011.
- [15] White, M., 2013. Coalition Military Fatalities. Retrieved 1st October, from: <http://icasualties.org/OEF/Fatalities.aspx>.
- [16] Linda, S. Schadler. *Polymer-based and polymer-filled nanocomposites*. In Nanocomposite science and technology, edited by P. M. Ajayan; L. S. Schadler P. V. Braun. WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim. pp. 77-153. 2003.
- [17] Lee, Y.S. & Wagner, N.J. *Dynamic properties of shear thickening colloidal suspensions*. Rheologica Acta, 42(3), 199-208.2003.
- [18] Lee, Y.S.; Wetzel, E.D.; Egres Jr., R.G. & Wagner,N.J.*Advanced body armor utilizing shear thickening fluids*. In Proceedings of the 23rd Army Science Conference Orlando, FL, 2-5 December 2002. 2002.
- [19] Lee, Y.S.; Wetzel, E.D. & Wagner, N.J. The Ballistic impact characteristics of Kevlar®Woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. J. Mater. Sci.,38(13), 2825-833.2003.
- [20] Hurlich, A., Metallurgical and ballistic investigations of fifty captured German helmets. Wartertown Arsenal Laboratory. 1944.
- [21] Beyer, J.C., Enos, W.F., Holmes, R.H., 1962. Personnel protective armor. In: Beyer, J.C. (Ed.), Wound Ballistics. Office of the Surgeon General, Department of the Army, Washington D.C.
- [22] Houff, C.W., Delaney, J.P., *Historical documentations of the infantry helmet research ad development*. USA, Human Engineering Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD. 1973
- [23] Carey, M.E.,. *Ballistic helmets and aspects of their design*. Neurosurgery 47, 678e689. 2000.
- [24] Rosenblatt, M., *Analysis of fragmentation protection for two commercial helmets*. In: Personal Armour Systems Symposium 2010, Fairmont Le Chateau Frontenac, Quebec. City, Canada. 2010.
- [25] Chen, X., *Advanced fibrous composite materials for ballistic protection*. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering.2016.