

Baja Untuk Ketahanan Balistik: Penelitian, Tantangan dan Peluang

Rusnaldy, Ismoyo Haryanto, Achmad Widodo dan Toni Prahasto

Multidisciplinary Analysis & Design Optimization Center (MADOC)

Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedharto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang

E-mail:

Abstrak

Aplikasi baja sangat luas digunakan dalam kehidupan manusia karena memiliki sifat yang sangat bervariasi serta relatif murah harganya bila dibandingkan dengan material teknik lainnya. Baja juga dapat digunakan untuk ketahanan balistik bagi peralatan pertahanan dan keamanan (Hankam) dengan mengambil sifat-sifat yang unggul untuk kebutuhan tersebut. Pada makalah ini penulis mencoba untuk *me-review* penelitian-penelitian yang telah dilakukan pada baja dan non baja sebagai material tahan peluru berikut tantangan dan peluangnya dalam membuat sendiri peralatan pendukung bagi sistem pertahanan dan keamanan nasional dalam rangka mendukung proses kemandirian bangsa atas industri hankam. Perkembangan penelitian penggunaan material tahan peluru khususnya penggunaan baja dan kemajuannya yang signifikan untuk aplikasi pertahanan keamanan dikaji melalui studi literatur. Beberapa rekomendasi dibuat untuk kegiatan penelitian penggunaan baja sebagai material tahan peluru dalam mengatasi hambatan-hambatannya. Dan beberapa peluang untuk industri baja nasional agar dapat berperan dalam pembuatan baja tahan peluru disajikan dalam makalah ini

Keywords: baja, ketahanan balistik, pertahanan & keamanan, hasil penelitian, peluang dan tantangan

Pendahuluan

Penelitian tentang material tahan peluru sebenarnya telah banyak dilakukan orang di dunia. Material yang digunakan sebagai bahan kajianpun bermacam-macam, mulai dari material logam hingga material non logam yang ringan namun mahal harganya. Kebutuhan akan material yang memiliki ketahanan balistik yang baik didorong oleh upaya untuk melindungi personel tentara dan polisi dalam operasi militer perang maupun operasi militer non perang.

Selama ini sebagian besar pengadaan sistem persenjataan dan pendukungnya di negara kita bergantung pada negara lain, seperti Amerika Serikat dan beberapa negara di Eropa. Ketergantungan yang besar akan ketersediaan sistem persenjataan dan sarana pendukungnya tentu saja akan menguras devisa. Disamping itu juga ketergantungan tersebut akan menjadi masalah manakala negara-negara besar penyuplai sistem persenjataan sepakat melakukan embargo kepada Indonesia. Untuk itu kemandirian bangsa Indonesia untuk mengadakan sistem persenjataannya sendiri sudah menjadi keharusan.

Untuk hal ini, pemerintah telah mengeluarkan PP No. 41 tahun 2010 tentang Kebijakan Umum Pertahanan Negara tahun 2010-2014. Salah satu isi kebijakan tersebut adalah kemandirian industri pertahanan sangat tergantung pada tiga pilar pelaku iptek, yaitu

perguruan tinggi dan lembaga litbang, industri dan TNI sebagai pengguna. Oleh sebab itu, adalah hal yang positif jika perguruan tinggi mulai melakukan kegiatan penelitian tentang material yang memiliki ketahanan balistik yang baik.

Seperti disebutkan di awal, para peneliti lain di dunia berusaha mencari material-material non baja yang ringan namun memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan dampak dan penetrasi dari peluru. Namun menyadari bahwa teknologi material di negara kita belum semaju di negara-negara lain, kemudian juga bahwa baja mudah didapatkan di Indonesia dengan harga yang relatif murah, maka ada baiknya penguasaan teknologi material yang memiliki ketahanan balistik dimulai dari material baja. Dengan meniru semangat bangsa Korea agar maju, "secanggih dan semaju apapun penelitian yang telah dihasilkan bangsa lain, selama bangsa Korea belum menguasai teknologinya tetap dianggap sebagai hal yang baru yang tetap terus harus diteliti". Jadi walau material baja telah dianggap 'usai' untuk diteliti, namun selama kita belum menguasai teknologi pembuatan baja untuk material tahan balistik, penelitian baja sebagai material tahan balistik merupakan hal yang baru bagi kita. Harapannya penguasaan teknologi pembuatan baja sebagai material tahan peluru disamping ikut mendorong tumbuhnya industri hankam nasional juga ikut menumbuhkan industri baja non hankam.

Langkah menuju ke arah sana telah disiapkan oleh tim peneliti di Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro. Namun sebelum melakukan penelitian sesungguhnya, langkah awal untuk memahami seluk beluk teknologi material tahan peluru berupa kajian literatur perlu dilakukan. Kajian literatur inilah yang disampaikan pada makalah ini.

Pada makalah ini akan direview perkembangan teknologi material tahan peluru termasuk penggunaan baja dan kemajuannya yang signifikan untuk aplikasi sistem hankam. Dari kajian tersebut, beberapa rekomendasi dibuat untuk kegiatan penelitian penggunaan baja sebagai material tahan peluru dalam mengatasi hambatan-hambatannya. Kemudian dikaji pula beberapa peluang industri baja nasional agar dapat berperan dalam pembuatan baja tahan peluru.

Hasil Penelitian Pengujian Balistik

Material Non Logam

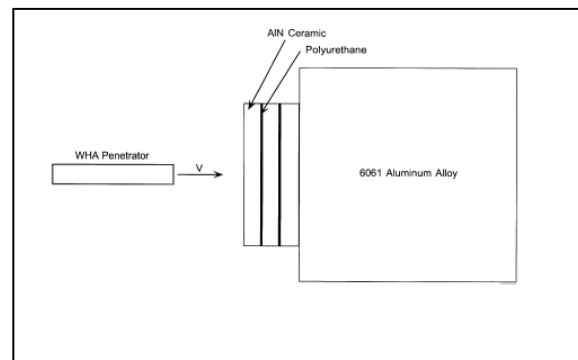
Material yang memiliki ketahanan balistik sangat diperlukan bagi tubuh personel tentara dan polisi dalam menjalankan tugasnya. Material yang memiliki ketahanan balistik yang baik adalah material yang mampu menyerap energi impact secara lokal serta mampu mendistribusikannya dengan merata secara cepat dan efektif ke seluruh permukaan material (Jacobs & Dingenen, 2001). Sehingga dengan demikian, material yang cocok untuk kriteria ini adalah material non logam yang memiliki densitas rendah dan kekuatan tinggi.

Penggunaan material non logam, seperti kevlar telah lama digunakan untuk ketahanan balistik yaitu sejak perang dunia kedua. Hal ini disebabkan karena kevlar memiliki sifat-sifat yang superior, seperti karakteristik penyerapan energi yang baik serta *strengh-to-weigth ratio* yang tinggi (Othman & Hassan, 2013). Namun dengan semakin tingginya permintaan untuk hal ini performan ketahanan balistik dapat diperbaiki dengan menggunakan *aramid fibers* (kevlar 29 atau kevlar 40), seperti yang dilakukan oleh Othman & Hassan (2013) yang mencoba meneliti pengaruh efek desain tekstil yang berbeda terhadap performan balistik aramid fibers tersebut.

Disamping kevlar, material non logam yang juga banyak diteliti adalah komposit dan keramik. Grujicic dkk. (2009) membuat model material tahan peluru dari komposit *armor-grade composites reinforced with high performance fibers* dan melakukan validasi dengan melakukan eksperimen, Model dan eksperimen yang dibuat dan dilakukan ternyata menunjukkan hasil yang baik untuk komposit tersebut sebagai material tahan peluru. Carillo dkk. (2012) menguji ketahanan balistik komposit yang merupakan pengembangan dari kevlar dengan matriks dari *aramid woven fabric* dan *polypropilene* (PP). Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa komposit dengan matriks dari PP mampu meningkatkan ketahanan

balistik material bila dibandingkan dengan menggunakan matriks *aramid woven fabric*.

Untuk material keramik, ketahanan penetrasi dan impact pada material keramik diuji oleh beberapa peneliti. Yadav & Ravichandran (2002) meneliti ketahanan penetrasi balistik pada tiga buah lapis ubin keramik AlN dimana terdapat lapisan tipis *polyurethane* diantara ubin-ubin tersebut, sehingga ketebalan totalnya sebesar 38,1 mm. Dibagian paling belakang diletakkan blok aluminium Al 6061-T6 sebagai penyangga (lihat gambar 1). Batang dari *tungsten heavy alloy* ditembakkan dengan kecepatan 1000 – 1200 m/s. Kedalaman penetrasi pada blok aluminium dijadikan sebagai ukuran ketahanan penetrasi material. Sebagai pembanding pengujian juga dilakukan pada lapisan keramik tanpa lapisan tipis *polyurethane* diantara ubin-ubin keramik. Hasilnya lapisan keramik dengan *polyurethane* memiliki ketahanan penetrasi yang lebih baik. Lapisan tipis *polyurethane* mampu menahan retak dan mengurangi kerusakan akibat kecepatan penetrasi yang tinggi.



Gambar 1. Susunan lapisan benda uji pada percobaan Yadav & Ravichandran (2003)

Ketahanan impact pada kecepatan tinggi pada struktur yang berlapis yang terbaru juga diteliti oleh Ramadhan dkk (2013). Lapisan yang dipakai adalah Kevlar-29 dan aluminium 6061-T6 dengan perekat *epoxy*. Sementara Feli & Asgari (2011) melakukan simulasi dengan FEM lapisan keramik (terbuat dari 99,5% alumina) dan komposit jenis *aramid* dengan total ketebalan sebesar 40 mm menggunakan *software* LS-Dyna.

Material Logam

Walaupun material non logam terbaru dengan berat sangat ringan telah banyak digunakan, namun material logam (terutama baja) dengan kekerasan yang tinggi masih sering digunakan dan dibutuhkan pada kendaraan militer untuk melindungi dari peluru karena harganya yang relatif murah dan mudah didapatkan di pasaran.

Material baja yang banyak digunakan sebagai material

uji coba balistik adalah jenis Weldox, yaitu jenis baja paduan rendah. Borvik dkk (2001) melakukan uji balistik pelat baja Weldox 460 E pada berbagai ketebalan dengan menggunakan proyektil terbuat dari baja berbentuk batang berdiameter 20 mm dengan hidung tumpul pada berbagai kecepatan. Hasilnya terlihat bahwa dengan bertambahnya ketebalan baja kemampuan melakukan penetrasi dari proyektil menjadi berkurang.

Palleti dkk. (2012) menggunakan baja jenis mild steel IS 2062 dengan *static yield strength* sebesar 250 Mpa untuk ketahanan balistik dari peluru yang dibuat dari baja EN-9 dengan *static yield strength* 350 Mpa. Ketahanan balistik baja ini dapat ditingkatkan jika ketebalan baja ditambah. Pengaruh ketebalan pada baja juga diuji oleh Durmus dkk (2011). Mereka menggunakan baja pelat hasil pengerolan dingin dengan ketebalan 1 dan 2 mm, hasilnya menunjukkan bahwa baja yang lebih tebal akan memiliki ketahanan balistik yang lebih baik. Jika baja dengan tebal 1 mm dilapisi menjadi 2 buah, ternyata ketahanan balistiknya tidak lebih baik bila dibanding baja dengan tebal 2 mm.

Disamping melakukan eksperimen untuk menguji ketahanan balistik, pengujian dengan melakukan simulasi juga banyak dilakukan. Salah satunya seperti yang dilakukan oleh Kilic & Ekici (2003). Mereka melakukan simulasi ketahanan balistik baja jenis 500 HB *armor steel* yang ditembakkan peluru yang terbuat dari baja yang dikeraskan berkaliber 7,62 mm. Simulasi dilakukan dengan cara membuat model 3D, kemudian memvalidasikan hasilnya dengan melakukan pengujian penetrasi peluru pada baja tersebut dengan ketebalan 9 dan 20 mm. Dari hasil simulasi dan eksperimen didapatkan hasil yang serupa, yang mengindikasikan bahwa proses simulasi dengan Ls-Dyna dapat digunakan dan cocok dengan hasil eksperimen jika model peluru yang dibuat adalah model seutuhnya (3D).

Sementara itu material logam lain selain baja juga digunakan dalam beberapa penelitian ketahanan balistik. Demir dkk. (2008) membandingkan ketahanan balistik dari aluminium jenis Al 5083, Al 7075, baja jenis *high strength low alloy steel* AISI 4140. Logam aluminium Al 7075 yang telah mengalami perlakuan panas hingga menjadi Al 7075-T651 memiliki kekerasan yang lebih tinggi dari baja AISI 4140 yang juga telah mengalami proses perlakuan panas. Dan dari uji balistik terlihat bahwa Al7075-T651 memiliki ketahanan balistik yang lebih baik bila dibandingkan dengan baja. Dari hasil ini dapat ditarik kesimpulan bahwa kekerasan logam mempengaruhi uji balistik dari material logam.

Pengaruh Lapisan pada Benda Uji

Dari hasil beberapa penelitian menunjukkan bahwa ketebalan benda uji akan mempengaruhi hasil uji

balistik dari material logam. Makin tebal logam tentunya membuat benda uji menjadi semakin berat. Upaya mengurangi berat banyak diuji dengan membuat benda uji tidak hanya terdiri dari satu pelat, namun melapisi dengan banyak pelat, baik dari material yang sejenis maupun dengan beda jenis.

Babaei dkk. (2011) menguji 4 jenis benda uji dengan lapisan ganda (*double-layered*), yaitu baja-baja, baja-aluminium, aluminium-baja dan aluminium-aluminium. Keempat benda uji tersebut ditembakkan peluru dengan hidung yang tumpul pada berbagai kecepatan dengan rentang 50 – 400 m/s. Dari hasil uji balistik didapatkan hasil berturut-turut mulai dari yang paling baik, baja-baja, baja-aluminium, aluminium-baja dan aluminium-aluminium.

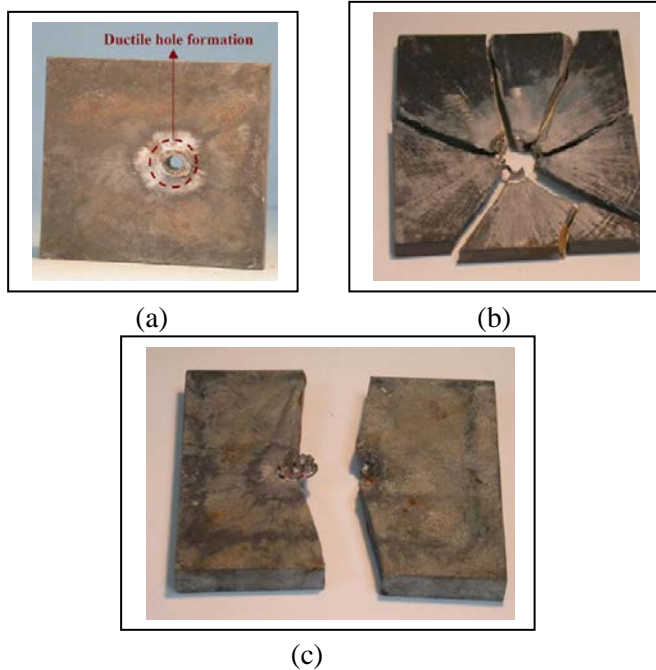
Selain melapisi logam dengan logam, uji balistik juga dilakukan untuk melihat karakteristik lapisan antara logam dengan non logam. Ubeyli dkk. (2011) melakukan uji balistik pada lapisan antara keramik alumina sebagai lapisan muka (*front layer*) dengan baja paduan rendah dan dibandingkan hasilnya dengan uji balistik benda uji dua lapis baja-baja. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa keramik alumina yang dijadikan sebagai pelapis muka pada baja dapat meningkatkan ketahanan balistik baja. Ubeyli dkk (2007) juga pernah menguji ketahanan balistik baja jenis *high strength low alloy steel* (50CrV4) jika dilapisi oleh komposit jenis *alumina/aluminum laminated*. Hasilnya disamping dapat memperbaiki karakteristik balistik benda uji juga dapat mengurangi berat sebesar 26%. Disamping itu kekerasan baja 50CrV4 yang berbeda-beda menyebabkan jenis kerusakan yang dihasilkan juga berbeda (lihat gambar 2). Tingkat kekerasan pada baja berperan penting pada karakteristik balistik benda uji.

Sementara itu Deng dkk (2012) meneliti pengaruh jumlah lapisan dan ketebalan lapisan terhadap ketahanan balistik baja jenis low carbon steel Q235 dengan yield stress 229 Mpa ketika ditembakkan peluru berdiameter 12,7 mm terbuat dari baja jenis hardened steel 38CrSi dengan nilai kekerasan HRC 55. Beberapa kesimpulan yang bisa ditarik dari pengujian tersebut adalah:

1. Pelat baja tunggal memiliki ketahanan balistik lebih tinggi dibanding pelat multilayer jika total ketebalan tidak mencapai nilai spesifiknya, namun jika melebihi nilai spesifiknya maka ketahanan balistik multilayer lebih baik dibanding dengan pelat tunggal.
2. Ketahanan balistik akan berkurang dengan bertambahnya lapisan pada ketebalan dibawah nilai spesifiknya.

Flores-Johnson dkk. (2011) melakukan penelitian pengaruh banyaknya lapisan pada logam yang dihujani peluru berdiameter 7,62. Logam yang digunakan adalah baja Weldox 700E dan aluminium Al 7075-T651. Hasil yang diperoleh adalah logam satu

lapis lebih baik bila dibanding dengan banyak lapis untuk jenis logam lapisan yang sama. Untuk logam dengan dua lapisan, dimana lapisan tipis aluminium di bagian depan dan lapisan tebal baja di bagian belakang, memiliki karakteristik lebih baik bila dibandingkan dengan baja multilapis. Hasil ini menunjukkan bahwa untuk memperbaiki karakteristik balistik dan mengurangi berat maka menggunakan logam berbeda untuk multilapis perlu dikaji lebih jauh



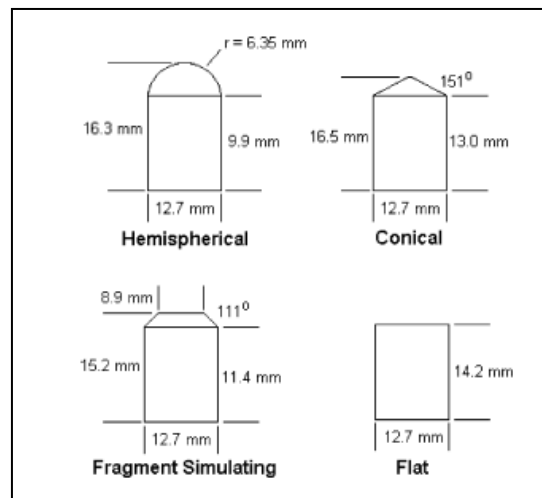
Gambar 2. Jenis kerusakan yang terjadi pada baja dengan harga kekerasan (a) 40 HRc; (b) 60 HRc; (c) 50 HRc (Ubeyli dkk, 2007)

Adanya celah di antara lapisan benda uji dari logam yang ulet dianalisa oleh Ben-Dor dkk (1998). Dari hasil analisa didapatkan bahwa ketahanan balistik logam akan meningkat jika besarnya celah di antara pelat logam bertambah. Namun hasil berbeda diperoleh dari hasil pengujian yang dilakukan oleh Nia & Hoseini (2011), dimana hasil pengujian mereka menunjukkan bahwa dengan bertambah besarnya celah di antara lapis pertama dan kedua benda uji menyebabkan ketahanan balistiknya menjadi berkurang.

Bentuk Proyektil

Karakteristik balistik disamping dipengaruhi oleh jenis material dan jumlah lapisan benda uji, ternyata juga dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran dari proyektil yang digunakan. Penelitian tentang pengaruh bentuk dan ukuran proyektil pernah dilakukan diantaranya oleh Chen & Medina (1998), Borvik dkk. (2002), Ulven dkk. (2003), Dey dkk (2004), Gupta dkk. (2007), Rusinek dkk. (2008) dan Iqbal dkk. (2010). Chen dan Medina (1998) meneliti pengaruh bentuk

proyektil pada ketahanan impak dengan kecepatan tinggi pada komposit B/Al. Jenis proyektil yang digunakan adalah *circular projectile*, *square projectile*, *thick projectile* dan *flat projectile*. Bentuk proyektil ternyata memiliki efek yang signifikan pada material uji, dimana kerusakan terbesar pada benda uji disebabkan oleh *flat projectile* bila dibandingkan dengan jenis yang lain. Ulven dkk. (2003) juga meneliti bentuk proyektil pada ketahanan balistik panel dari material komposit jenis *carbon/epoxy*. Mereka menggunakan bentuk proyektil *hemispherical*, *conical*, *fragment simulating* dan *flat* (lihat gambar 3). Hasilnya menunjukkan bahwa proyektil berbentuk *conical* memberikan ketahanan balistik lebih baik diikuti oleh bentuk *flat*, *hemispherical* dan *fragment simulating*. Pengaruh bentuk proyektil juga diujikan pada pelat baja Weldox 460 E dengan ketebalan 12 mm oleh Borvik dkk. (2002). Mereka menguji dengan menggunakan bentuk proyektil *flat*, *hemispherical* dan *conical*. Bentuk hidung proyektil ternyata mempengaruhi mekanisme penyerapan energi dan jenis kerusakan yang ditimbulkan. Disamping bentuk hidung, ukuran sudut dan radius hidung proyektil (lihat gambar 4) juga memberikan efek balistik yang berbeda-beda (lihat gambar 5).



Gambar 3. Bentuk Proyektil (Ulven dkk., 2003)

Tantangan dan Peluang

Dari studi literatur yang telah disajikan di bagian sebelumnya jelas terlihat banyak peluang yang bisa dilakukan untuk mengembangkan material baja untuk ketahanan balistik. Beberapa catatan penting yang dapat diambil dari studi literatur tersebut adalah:

1. Ketahanan balistik baja ditentukan oleh kekerasan pada sisi yang pertama kali menerima penetrasi dari peluru, dimana makin keras baja makin baik ketahanan balistiknya.
2. Pengurangan berat baja dapat dilakukan dengan

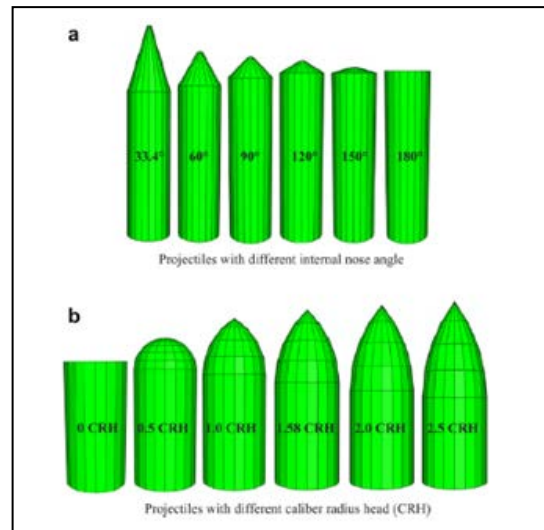
memberi lapisan dari material non logam pada lapisan mukanya

3. Ketebalan baja juga mempengaruhi karakteristik balistiknya
4. *Strength-to-weight ratio* merupakan keunggulan utama pada material non logam yang memiliki ketahanan balistik yang baik

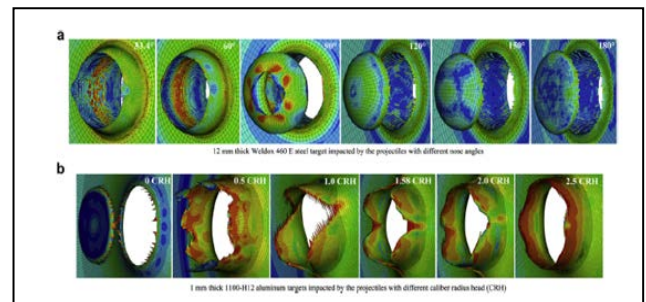
Dari beberapa catatan penting tersebut, maka terdapat banyak tantangan untuk mengembangkan baja sebagai material tahan peluru, seperti bagaimana meningkatkan nilai kekerasan permukaan pada sisi pelat baja yang pertama kali bersentuhan dengan peluru, bagaimana mengurangi berat baja dengan tetap mempertahankan ketebalan idealnya, serta bagaimana meningkatkan *strength-to-weight ratio* baja. Kemudian, sejauh pengamatan penulis, kriteria suatu material dapat digunakan sebagai material yang memiliki ketahanan balistik yang baik tidak dikemukakan, sehingga kajian untuk menentukan kriteria suatu material dapat digunakan sebagai material tahan peluru menjadi peluang untuk dilakukan. Kemudian dari kriteria tersebut dapat dilakukan proses pemilihan material dengan metode proses pemilihan yang sudah baku yang telah banyak diteliti oleh peneliti lain atau dapat juga mengembangkan sendiri metode pemilihan material tersebut.

Namun disamping adanya beberapa peluang, tentu saja ada beberapa hambatan yang dapat dijadikan sebagai tantangan dalam pengembangan material baja sebagai material tahan balistik. Beberapa hambatan tersebut adalah: (1) Fasilitas pengujian balistik umumnya tidak dimiliki oleh perguruan tinggi; (2) Informasi mengenai peluru dan berbagai jenis peluru yang digunakan untuk pengujian balistik akan sulit didapat; (3) Belum terjalin kerjasama yang baik antara 3 lembaga seperti yang tertulis dalam PP No.41 tahun 2010.

Hambatan-hambatan tersebut tentu saja menjadi tantangan bagi kita bersama agar keberhasilan pengembangan material baja bisa dapat terwujud. Sementara peluang mengembangkan baja sebagai material tahan peluru bagi industri baja nasional masih sangat terbuka lebar, mengingat beberapa hal berikut ini: (1) jumlah personil tentara dan polisi yang cukup besar; (2) kebutuhan akan peralatan sistem senjata masih sangat besar dan sistem persenjataan yang dimiliki sebagian besar masih diimpor dari negara lain; (3) bahan baku baja berupa bijih besi masih banyak terdapat di dalam negeri dan harganya yang relatif murah dibanding material teknik lainnya.



Gambar 4. Besar sudut hidung dan caliber radius head (Iqbal dkk, 2010)



Gambar 5. Jenis kerusakan yang diakibatkan oleh pengaruh ukuran proyektil (Iqbal dkk, 2010)

Kesimpulan

Dari hal-hal di atas ada beberapa kesimpulan yang dapat ditarik:

1. Baja sebagai material tahan peluru masih memiliki banyak peluang untuk diteliti dan dikembangkan
2. Karakteristik baja sebagai material tahan peluru tergantung dari kekerasan, kekuatan, ketebalan dan jenis serta jumlah lapisan yang digunakan.
3. Bagaimana meningkatkan kekerasan di sisi yg pertama kali dipenetrasi oleh peluru, bagaimana meningkatkan *strength-to-weight ratio* benda uji terbuat dari baja, bagaimana menentukan kriteria suatu material tahan peluru dan bagaimana memilih dari sekian banyak jenis baja dengan teknik proses pemilihan material yang baik menjadi tantangan utama dalam penelitian baja sebagai material tahan balistik
4. Peluang untuk pengembangan baja sebagai material tahan balistik masih terbuka lebar

Ucapan Terima kasih

Ucapan terima kasih tim penulis haturkan kepada

Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro atas dukungannya dalam keikutsertaan pada SNTTM XI tahun 2012 di UGM Yogyakarta

Referensi

- Babaei, B., Shokrieh, M.M., Daneshjou, K. The ballistic resistance of multi-layered targets impacted by rigid projectiles. *Materials Science and Engineering A* 530, pp. 208-217 (2011)
- Ben-Dor, G., Dubinsky, A., Elperin, T. Effect of air gaps on ballistic resistance of targets for conical impactors. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 30, pp. 243-249 (1998)
- Borvik, T., Leinum, J.R., Solberg, J.K., Hopperstad, O.S., Langseth, M. Observations on shear plug formation in Weldox 460 E steel plates impacted by blunt-nose projectiles. *International Journal of Impact Engineering* 25, pp. 553-572, (2001)
- Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Malo, K.A. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses Part I: Experimental study. *International Journal of Impact Engineering* 27, pp. 19-35 (2002)
- Carrillo, J.G., Gamboa, R.A., Flores-Johnson, E.A., Gonzales-Chi, P.I., Ballistic performance of thermoplastic composite laminates made from aramid woven fabric and polypropylene matrix, *Polymer Testing* 31, pp. 512-519 (2012)
- Chen, J.K. & Medina, D.F. The effect of projectile shape on laminated composite perforation. *Composites Science and Technology* 58, pp. 1629-1639 (1998)
- Demir, T., Ubeyli, M., Yildirim, R.O. Investigation on the ballistic impact behaviour of various alloys againsts 7.62 mm armor piercing projectile. *Materials and Design* 29, pp. 2009-2016 (2008)
- Dey, S., Borvik, T., Hopperstad, O.S., Leinum, J.R., Langseth, M. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes. *International Journal of Impact Engineering* 30, pp. 1005-1038 (2004)
- Durmus, A., Guden, M., Gulcimen, B., Ulku, S., Musa, Experimental investigations on the ballistic impact performances of cold rolled sheet metals. *Materials and Design* 32, pp. 1356-1366 (2011)
- Feli, S., & Asgari, S. Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact. *Composite: Part B* 42, pp. 771-780 (2011)
- Flores-Johnson, E.A., Saleh, M., Edwards, L., Ballistic performance of multilayered metallic plates impacted by a 7.62 mm APM2 projectile. *International Journal of Impact Engineering* 38, pp. 1022 – 1032 (2011)
- Grujicic, M., Glomski, P.S., He, T., Arakere, G., Bell, W.C., Cheeseman, B.A., Material modeling and ballistic-resistance analysis of armor-grade composites reinforced with high performance fibers, *Journal of Materials Engineering and Performance* 18, pp. 1169-1182 (2009)
- Gupta, N.K., Iqbal, M.A., Sekhon, G.S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates. *International Journal of Solids and Structures* 44, pp. 3411-3439 (2007)
- Iqbal, M.A., Gupta, C., Diwakar, A., Gupta, N.K. Effect of projectile nose shape on the ballistic resistance of ductile targets. *European Journal of Mechanics A/Solids* 29, pp. 683-694 (2010)
- Jacobs, M.J., & Dingenen, J.L. Ballistic protection mechanism in personal armor. *Journal of Material Science* 36, pp. 3137-3142 (2001)
- Kilic, N. & Ekici, B. Ballistic resistance of high hardness armor steels againsts 7.62 mm armor piercing ammunition. *Materials and Design* 44, pp. 35-48 (2003)
- Nia, A.A. & Hoseini, G.R. Experimental study of perforation of multi-layered targets by hemispherical-nosed projectiles. *Materials and Design* 32, pp. 1057-1065 (2011)
- Othman, A.R. & Hassan, M.H. Effect of different construction designs of aramid fabric on the ballistic performances. *Materials and Design* 44, pp. 407-413 (2013)
- Palleti, H.N.K.T., Gurusamy, S., Kumar, S., Soni, R., John, B., Vaidya, R., Bhoge, A., Naik, M.K. Ballistic impact performance of metallic targets. *Materials and Design* 39, pp. 253-263 (2012)
- Ramadhan A.A., Abu Talib, A.R., Rafie, M., Zahari, R. High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminium laminated panels. *Materials and Design* 43, pp. 307-321 (2013)
- Rusinek, A., Rodriguez-Martinez, J.A., Arias, A., Klepaczko, J.R., Lopez-Puente, J. Influence of conical

projectile diameter on perpendicular impact of thin steel plate. *Engineering Fracture Mechanics* 75, pp. 2946-2967 (2008).

Ubeyli, M., Deniz, H., Demir, T., Ogel, B., Gurel, B., Keles, O. Ballistic impact performance of an armor material consisting of alumina and dual phase steel layers. *Materials and Design* 32, pp. 1565-1570 (2011)

Ulven, C., Vaidya, U.K, Hosur, M. V. Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels. *Composite Structure* 61, pp. 143-150 (2003).

Yadav, S. & Ravichandran, G. Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures. *International Journal of Impact Engineering* 28, pp.557-574 (2003)