



MODIFIKASI DAN PENGEMBANGAN BAJA KOMERSIAL AISI 4340 SEBAGAI BAJA TAHAN PELURU

Beny Bandanadjaja

Jurusan Teknik Pengecoran Logam, Politeknik Manufaktur Bandung
Jl. Kanayakan No 21, Dago-Bandung 40135
Telp./Fax. (022) 2500241 / (022) 2502649
e-mail: benybj@yahoo.com

ABSTRAK

Penelitian yang dilakukan merupakan pengembangan baja komersial AISI 4340 untuk dijadikan baja tahan. Rancangan plat dibuat untuk dapat meningkatkan performansi balistik plat baja AISI 4340 dalam menahan tumbukan proyektil kaliber 5,56 mm berinti lunak berkecepatan 930 m/s. Metode perancangan diawali dengan kalibrasi parameter simulasi terhadap hasil eksperimen menggunakan beberapa plat dengan kekerasan seragam (monolitik hardness). Untuk meningkatkan performansi balistik plat monolitik maka pada bagian depan plat dibuat memiliki kekerasan lebih tinggi sehingga membentuk multilayer hardness pada permukaan depan plat. Parameter monolitik kemudian digunakan untuk membuat rancangan dan simulasi pada plat dengan kekerasan berlapis. Uji lapangan terhadap plat multilayer hardness dilakukan untuk membuktikan hasil simulasi. Pengamatan terhadap kerusakan yang terjadi secara kualitatif dilakukan untuk menilai performansi balistik. Hasil yang diperoleh menunjukkan sampel dengan profile kekerasan permukaan sebesar 795-524 VHN (gradual setebal 0,8 mm) dan kekerasan bagian belakang 524 VHN (setebal 7,2 mm) dapat menahan laju proyektil. Sampel tersebut memiliki kerusakan minimal yaitu dengan lebar 2 mm dan dalam 0,19 mm tanpa adanya cacat retak. Sementara plat monolitik dengan kekerasan seragam sebesar 527 VHN memiliki lebar rusak sebesar 7 mm dan kedalaman 0,74 mm ditambah adanya retak permukaan sepanjang 3 mm. Dapat disimpulkan bahwa pemberian tambahan lapisan keras pada permukaan baja dalam bentuk multilayer hardness dapat meningkatkan performansi balistiknya.

Kata kunci : Baja Anti Peluru, Balistik Kekerasan berlapis, Proyektil, Adiabatic Shear Band

ABSTRACT

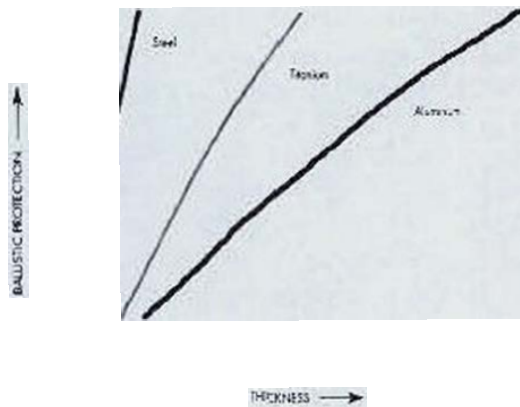
The research conducted is the development of commercial AISI 4340 steel to be used as an armor steel. The design of armor plate was made in order to improve the ballistic performance of AISI 4340 steel plate in the collision withstand 5.56 mm caliber projectile soft core with a speed of 930 m/s. Design method begins with calibration of a simulation parameters of the experimental results using several plates with uniform hardness (monolithic hardness). To improve the ballistic performance of the monolithic plate, the front of plate is made with a higher hardness thus it forming the multilayer hardness on the front surface of the plate. Monolithic parameter is then used to create the design and simulation on the plate with a multilayered hardness. Field testing of multilayer hardness plate conducted to prove the simulation results. Observation of the damage done to qualitatively assess the ballistic performance. The results showed that samples with profile on the surface hardness of 795-524 VHN (gradual thickness in depth of 0.8 mm)

and hardness of the rear plate of 524 VHN (7.2 mm thick) succeeded to stop the projectile striking. These samples have a minimal damage that is a width of 2 mm and 0.19 mm of depth, crack defects are not found significantly. While the monolithic plate with uniform hardness of 527 VHN has damage wide by 7 mm and a depth of 0.74 mm plus a surface crack along the 3 mm. It can be concluded that the additional of a hard on the steel plate surface in the form of multilayer hardness can improve ballistic performance of this steel.

Keyword: Armor Steel, Ballistic, Multilayer Hardness, Projectile, Adiabatic Shear Band

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan material tahan peluru yang ringan pada kendaraan tahan peluru sangat diperlukan dalam rangka meningkatkan kemampuan mobilitas kendaraan dan efisiensi konsumsi bahan bakar. Baja telah lama dipergunakan sebagai bahan tahan peluru (armor). Baja dipilih karena sifat mekaniknya yang cukup baik, lihat Gambar 1. Baja memiliki ketahanan balistik yang lebih baik dibanding Titanium dan Aluminium. Selain itu, baja merupakan material dengan perilaku yang sudah terkarakterisasi dengan baik berdasarkan data-data yang tersedia.



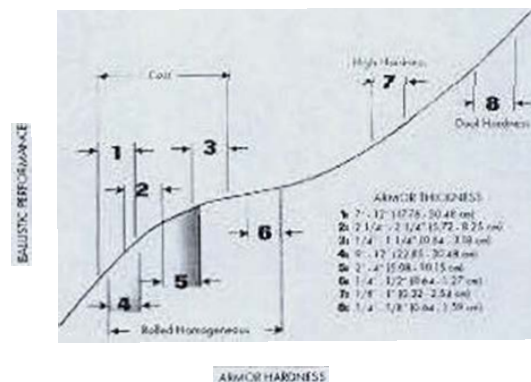
Gambar 1. Perbandingan Sifat Balistik Baja, Titanium dan Aluminium

Kemudahan baja untuk diproses dengan mesin menjadikan baja sebagai bahan pilihan anti peluru. Kelemahan baja adalah masa jenisnya yang cukup tinggi menjadikan bobot baja cukup besar. Oleh karena itu pengembangan baja sebagai bahan tahan peluru diarahkan kepada peningkatan kualitas plat baja sehingga plat baja tahan peluru dapat dibuat dengan ukuran yang lebih tipis.

Perbaikan performansi balistik baja dapat dilakukan dengan meningkatkan kekerasan baja. Beberapa penelitian mendukung teori bahwa semakin keras baja maka semakin baik performansi balistiknya (Dikshit, 1995 dan Dey, 2004). Namun para peneliti juga menyebutkan bila kekerasan terlalu tinggi ketahanan balistik

baja kembali menurun (Edwards, 1997). Bila kekerasan yang diberikan pada baja sudah memberikan kemampuan maksimal maka perbaikan performansi balistik dapat di tingkatkan lagi dengan membuat konstruksi plat baja dengan susunan berlapis. Sistem plat berlapis yang dikembangkan para peneliti berupa plat dengan kekerasan sama yang disusun dengan menggunakan spasi atau tanpa spasi. Ada pula yang menggunakan susunan plat dengan kekerasan berbeda. Selain itu ada pula pengembangan plat yang memiliki kekerasan ganda dalam satu plat.

Gambar 2. menunjukkan perkembangan penggunaan plat baja sebagai bahan tahan peluru. Jenis plat RHA (Rolled Homogenous Armor) dan CHA (Cast Homogenous Armor) pada awalnya banyak digunakan. Kemudian dalam perkembangannya penggunaan HHA (High Hardness Armor) dikembangkan untuk meningkatkan performansi balistik material. Pada kondisi monolitik plat HHA sudah tidak dapat ditingkatkan lagi performansinya maka kemudian muncul pengembangan DHA (Dual Hardness Armor). DHA merupakan plat baja dengan performansi balistik yang paling baik. Beberapa peneliti masih terus mengembangkan penelitian pada plat baja dengan kekerasan berlapis. Tujuannya untuk mengatasi berbagai permasalahan yang masih muncul dalam plat dengan kekerasan berlapis.



Gambar 2. Performansi balistik berbagai jenis plat baja (Lane, 2002)

Dual Hardness Armor Steel dikembangkan mulai tahun 1965 (Sliney, 1965) dan mulai diproduksi sejak tahun 1969 (Allen, 1969). Montgomery (2004) mengatakan Dual Hardness Armor Steel (DHA, MIL-DTL-46099) adalah jenis baja tahan peluru dengan dua lapisan kekerasan yang berbeda. Pada bagian depan dibuat sangat keras sementara pada bagian belakang dibuat lebih lunak. DHA dikembangkan dengan menempelkan material dengan kekerasan 59 – 63 HRC pada bagian depan, biasanya digunakan jenis baja S-7 tool steel, kemudian ditempelkan pada baja dengan kekerasan 50-53 HRC. Proses penempelan menggunakan metode rolled bonding. Bagian depan yang keras berfungsi sebagai penghancur proyektil dan bagian belakang yang lunak berfungsi sebagai penangkap pecahan yang terjadi. DHA memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan jenis monolitik dalam menahan beban balistik baik peluru tumpul maupun tajam. Namun DHA memiliki harga yang relatif lebih mahal, selain itu sulit dibentuk dan di las. Pada ukuran plat yang luas proses rolled bonding semakin sulit dilakukan, banyak daerah-daerah yang tidak melekat dengan sempurna.

Richard (1996) mengembangkan pembuatan plat dual hardness dengan metode induction heat-treatment untuk menghasilkan satu plat dengan kekerasan berlapis. Penggunaan frekuensi tinggi pada induction heat-treatment dapat menghasilkan pemanasan pada ketebalan tertentu pada plat, sehingga dapat dilakukan proses induction tempering atau induction rehardening untuk dapat menghasilkan plat dengan kekerasan berlapis. Metode induction tempering oleh Richard dinyatakan dapat menghasilkan profil kekerasan berlapis yang lebih baik. Plat dual hardness konvensional yang banyak digunakan berbentuk plat hasil rolled-bonding antara dua plat yang memiliki kekerasan berbeda. Pengembangan satu plat dengan dua kekerasan oleh Richard (1996) adalah untuk mengatasi permasalahan delaminasi atau lepasnya ikatan plat dual hardness akibat tembakan proyektil jenis ujung tajam (armor piercing/AP) kaliber 12,7 mm. Dengan membentuk satu plat yang memiliki dua kekerasan tanpa

sambungan maka integritas antara bagian keras dan lunak akan menjadi lebih baik. Hasil optimal plat dual hardness Richard (1996) diperoleh pada kekerasan 60 HRC pada bagian depan dan 51 HRC pada bagian belakang. Ketebalan lapisan keras sebesar 40 % dari total tebal sebesar 0,536 in (13,6 mm). Pada penembakan menggunakan proyektil 12,7 mm diperoleh balistik limit sebesar 2956 ft/s (900 m/s).

Gooch dkk. (2005) mengembangkandual hardness dengan metode Electroslag Remelted (ESR). Proses pembuatan dimulai dengan mencairkan elektroda baja Mn-Si-Mo untuk bagian belakang plat. Bahan dicairkan kedalam cetakan ingot dengan dinding pemisah di bagian tengah. Setelah cairan pertama mendingin kemudian dinding pemisah dibuka dan dicairkan bahan kedua yaitu elektroda baja Cr-Mo-V-Si. Skema cetakan ingot ditunjukkan pada Gambar 4.

Ikatan antar kedua bahan kemudian terjadi karena bahan yang pertama dalam keadaan setengah cair dan bahan kedua masih cair. Hasilnya berupa ingot yang kemudian mengalami proses anealing. Selanjutnya ingot ditempa untuk menghasilkan plat dari tebal awal ingot sebesar 300 mm menjadi 30 mm. Kemudian plat diberikan rol panas untuk mendapatkan ketebalan yang diinginkan. Perlakuan panas akhir diberikan dalam bentuk pengerasan (hardening) dan tempering. Profil kekerasan yang terjadi adalah bagian keras 500-560 BHN dan bagian belakang 340-370 BHN. Uji tembak dilakukan dengan proyektil AP (Armor Piercing) berinti baja keras kaliber 7,62 mm menunjukkan bahwa nilai ballistic limit dual hardness lebih unggul dibanding HHA (High Hardness Armor) dan RHA (Rolled Homogenous Armor). Namun pada pengujian tembak menggunakan peluru FSP (Fragment Simulating Projectile) kaliber 7,62 mm nilai ballistic limit-nya berada dibawah RHA namun masih lebih baik dibanding HHA.

Dari berbagai literatur dan penelitian balistik yang telah dilakukan pada plat dengan susunan berlapis dan kekerasan berlapis masih banyak ditemukan hasil yang kontradiktif. Hal tersebut menyulitkan untuk dapat membandingkan hasil

yang diperoleh para peneliti tersebut. Pada saat ini penelitian mengenai plat dengan susunan berlapis atau dengan kekerasan berlapis masih perlu diteliti lebih lanjut. Pilihan tertuju pada pembuatan plat dengan kekerasan berlapis karena dari berbagai literatur banyak yang sependapat bahwa plat dengan kekerasan berlapis memiliki performansi balistik yang lebih baik. Penentuan bagian keras atau bagian lunak di bagian depan masih pula merupakan kontradiktif diantara peneliti. Kleponis (2000) dan Teng (2008) berpendapat bahwa bagian lunak di depan lebih baik sementara Richard (1996), Buchar (2002) dan Montgomery (2004) mengatakan posisi keras di depan lebih baik.

Penelitian yang dilakukan diarahkan pada pembuatan plat dengan tingkat kekerasan berlapis dengan penempatan bagian keras didepan. Hipotesisnya adalah bagian terkeras di depan akan berfungsi menghancurkan proyektil sehingga sebagian besar energi akan digunakan untuk menghancurkan proyektil. Bagian belakang yang lunak akan berfungsi menyerap energi sisa di proyektil dalam bentuk deformasi plastis. Penempatan bagian keras di depan akan menghasilkan luka bekas tembakan yang lebih sedikit/kecil dibanding dengan penempatan bagian lunak didepan. Bila terjadi retak pada permukaan keras maka rambatan retak akan dapat di hambat oleh bagian lunak yang berada dibelakang. Namun bila yang ditempatkan pada bagian depan adalah material lunak maka apabila terbentuk retak permukaan maka bagian belakang yang keras akan sulit menahan rambatan retak yang terjadi saat struktur mendapat beban dinamik lanjutan. Hal ini terjadi karena secara umum material yang lebih keras lebih rentan terhadap rambatan retak.

Penelitian ditujukan untuk membuat rancangan plat dengan kekerasan berlapis dalam satu plat. Bagian depan plat dibuat memiliki lapisan yang keras kemudian secara gradual kekerasan menurun ke bagian belakang. Dengan susunan kekerasan berlapis pada satu plat diharapkan integritas plat lebih baik dan performansi balistik plat akan lebih baik dibanding dengan plat dengan kekerasan monolitik.

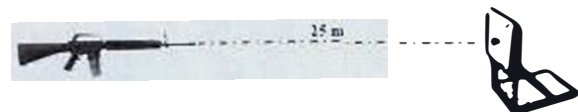
BAHAN DAN METODE

Metodologi yang digunakan menggunakan teknik analisis melalui simulasi komputer dan eksperimen lapangan. Penelitian dilakukan dalam dua tahap yaitu:

Tahap I yaitu melakukan kalibrasi parameter simulasi balistik. Caranya dengan melakukan pengujian balistik pada tiga buah plat dengan variasi kekerasan. Variasi kekerasan diperoleh melalui proses perlakuan panas. Penomoran sampel seperti yang tertera pada Tabel 1. Skema uji tembak ditunjukkan pada Gambar 3.

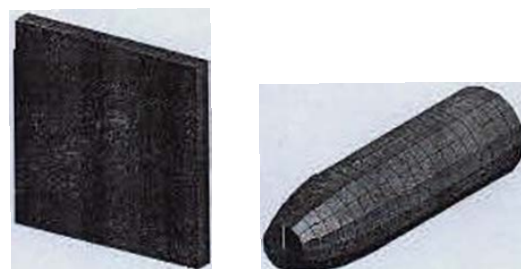
Tabel 1. Sampel plat dengan kekerasan monolitik

Plat A.1	Plat A.2	Plat A.3
Hardening 820°C, 15-20 menit, Quench oli		
Temper. 520°C, 2 jam	Temper. 300°C, 2 jam	Non Temper
441 VHN	527 VHN	677 VHN



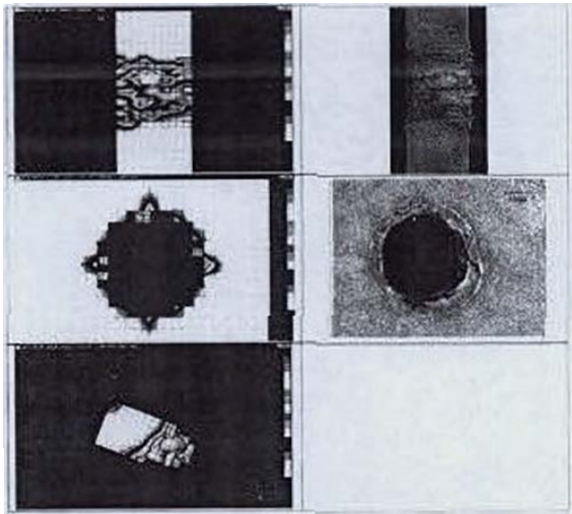
Gambar 3. Skema uji tembakan

Setelah itu dilakukan pemodelan untuk simulasi komputer sesuai dengan kondisi yang lapangan yang telah dilakukan. Pemodelan disimulasi dengan menggunakan parameter yang terukur di eksperimen. Model plat dan proyektil ditunjukkan pada Gambar 4. Beberapa parameter yang tidak diperoleh dari eksperimen dicari dari literatur yang sesuai. Simulasi dilakukan secara berulang untuk mendapatkan hasil yang sama dengan eksperimen.



Gambar 4. Model simulasi balistik

Bila hasil simulasi telah menunjukkan bentuk kerusakan yang mirip dengan uji lapangan maka parameter simulasi yang digunakan dapat dianggap telah sesuai (Gambar 5). Luaran yang diperoleh dari proses tahap I adalah parameter simulasi pada tiga kekerasan monolitik.



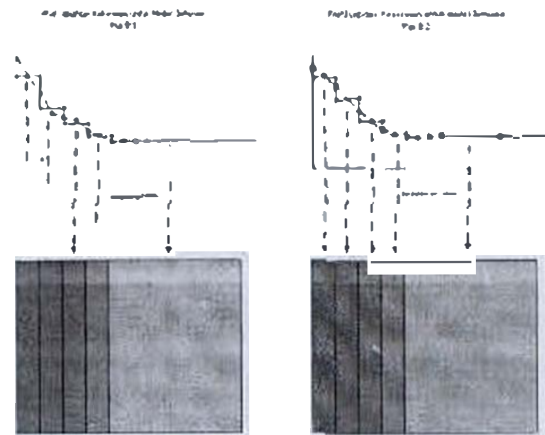
Gambar 5. Perbandingan hasil simulasi dan uji tembak

Tahap II dilakukan dengan membuat rancangan plat dengan kekerasan berlapis. Pembentukan lapisan keras pada permukaan dilakukan dengan metode karburisasi. Penomoran sampel ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sampel plat dengan kekerasan gradual

Plat B.1	Plat B.2
Carburizing 900°C, 5 Jam, Udara bebas	
820°C, 20 menit, Quench oli	
Temper 300°C, 2 jam	Non Temper
795-524 VHN setebal 0,8 mm	1119-643 VHN setebal 0,8 mm

Profil kekerasan permukaan diukur dan dibuatkan model lapisan kekerasan dengan mengambil kekerasan rata-rata pada ketebalan 0,2 mm. Gradasi kekerasan akan diperoleh dalam bentuk lapisan-lapisan kekerasan dengan tebal masing-masing 0,2 mm. Model simulasi dibuat dengan bentuk plat berlapis. Masing-masing lapisan memiliki kekerasan yang berbeda diberikan data parameter sesuai dengan parameter yang diperoleh pada tahap I. Pendekatan interpolasi dilakukan pada data parameter yang ada. Model berlapis ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pemodelan layer kekerasan gradual untuk simulasi

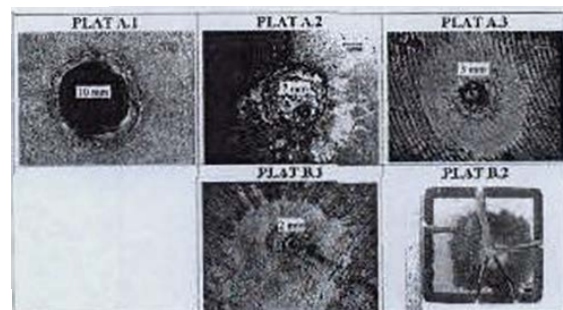
Output simulasi diperoleh yang merupakan prediksi dari performansi balistik plat kekekerasan berlapis. Selanjutnya dilakukan pengujian balistik pada plat tersebut. Hasil uji balistik dibandingkan dengan simulasi.

Analisis dilakukan dengan melihat performansi balistik seluruh plat, yaitu plat monolitik dan plat kekerasan berlapis untuk dibandingkan. Ukuran performansi berupa perbandingan dimensi kerusakan masing-masing sampel dan ada tidaknya cacat retak. Sampel dengan dimensi kerusakan dan retak yang kecil dinilai memiliki performansi yang lebih baik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis terhadap performansi balistik plat monolitik (sampel A) dan plat kekerasan berlapis (sampel B) meliputi perbandingan dimensi kerusakan, pembentukan adiabatic shear band dan retak.

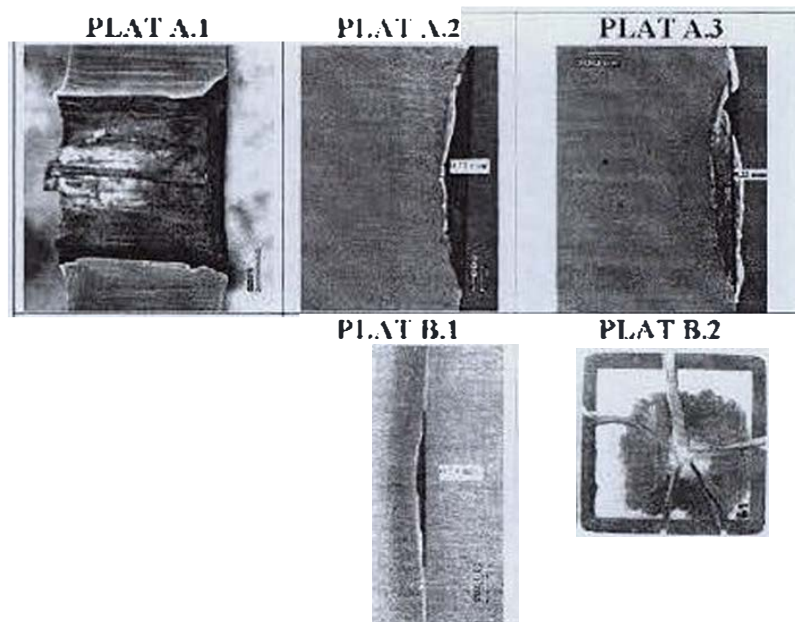
Lebar Kerusakan dan Kedalaman Penetrasi



Gambar 7. Lebar kerusakan sampel A dan B

Gambar 7. menunjukkan dimensi kerusakan plat A dan B yaitu ukuran diameter kerusakan. Plat A.1 dengan kekerasan 441 VHN mengalami penembusan oleh proyektil dengan diameter lubang tembusan sebesar 10 mm. Plat A.2 (527 VHN) dan plat A.3 (677 VHN) dapat menahan proyektil dan menghasilkan kawah dengan diameter masing-masing 7 mm dan 3 mm sementara kedalaman sedalam 0,74 mm dan 0,22

mm seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 8. Dari pengamatan kerusakan yang terjadi pada plat monolitik terlihat bahwa semakin tinggi kekerasan semakin kecil tingkat kerusakannya. Hal tersebut cocok dengan penelitian yang dilakukan oleh Dikshit (1995) yang mengatakan bahwa performansi balistik pada plat baja RHA meningkat seiring dengan meningkatnya kekerasannya.



Gambar 8. Kedalaman penetrasi

Plat A.3 memiliki kekerasan yang paling tinggi sebesar 677 VHN. Kekerasan plat A.3 dihasilkan dari proses perlakuan panas hardening. Dengan proses pendinginan celup oli dan tanpa tempering. Kekerasan tersebut tidak dapat ditingkatkan lagi dengan metode peningkatan kecepatan pendinginan menggunakan air sebab akan menimbulkan retak pada saat dicelup kedalam air. Oleh karena itu kekerasan monolitik maksimum yang dapat dicapai bahan AISI 4340 hanya dapat dicapai sampai kekerasan 677 VHN.

Peningkatan performansi balistik bahan AISI 4340 dilakukan dengan menambah lapisan yang lebih keras pada permukaan. Plat B memiliki kekerasan berlapis yang dihasilkan dari proses karburisasi. Kekerasan lapisan yang dimiliki oleh plat B.1 berada pada range 795-524 VHN gradual sedalam 0,8 mm dan plat B.2 memiliki

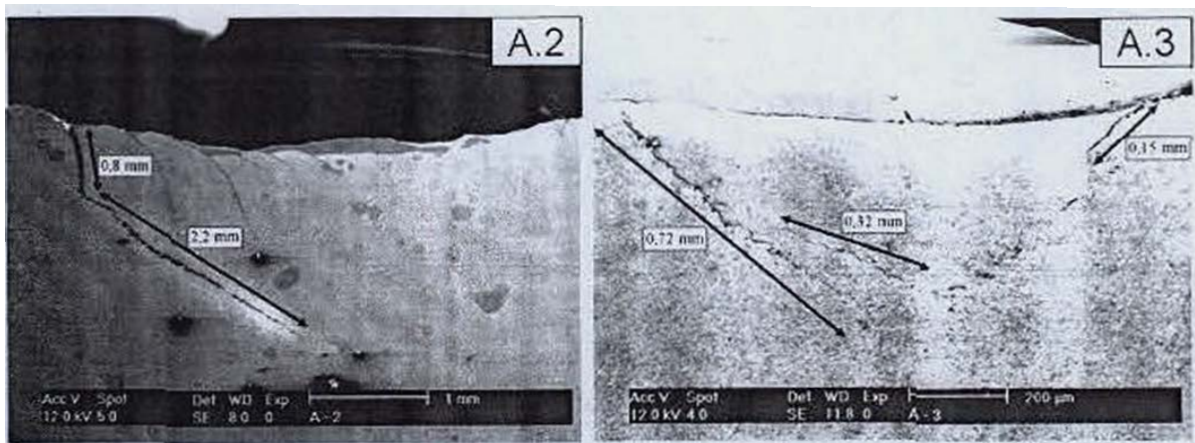
range kekerasan sebesar 1119-643 VHN gradual sedalam 0,8 mm. Pada Gambar 7. dan Gambar 8. ditunjukkan kerusakan yang timbul pada plat B. Plat B.1 memiliki diameter kerusakan sebesar 2 mm dengan kedalaman kawah sebesar 0,19 mm. Plat B.2 yang memiliki kekerasan lebih tinggi dibanding plat B.1 justru tidak dapat menahan laju proyektil dan mengalami pecah.

Bila dibandingkan dengan plat A yang memiliki kekerasan monolitik maka plat B dengan kekerasan berlapis memiliki dimensi kerusakan yang lebih kecil. Mekanisme kerusakan yang terjadi bila ditinjau dari sisi energi yaitu sebagai berikut: Energi total awal yang ada di proyektil merupakan energi kinetik $E = \frac{1}{2} mv^2$. Energi total kemudian terbagi menjadi dua pada saat proyektil menumbuk target, sebagian energi akan dipindahkan ke material target, sebagian lagi akan masih berada di proyektil.

Energi yang dipindahkan ke material target berupa penyerapan energi tersebut. Bentuk penyerapan energi berubah menjadi deformasi plastis dan atau retakan. Retakan terbagi menjadi dua yaitu retakan karena beban tarik (tensile crack) dan retakan akibat beban geser (shear crack). Semakin lunak plat maka bentuk kerusakan cenderung kepada deformasi plastis dan dapat menghasilkan lubang penembusan. Semakin keras plat maka kerusakan dalam bentuk deformasi akan semakin kecil namun kecenderungan pembentukan adiabatic shear band dan retakan akan semakin besar. Untuk material yang sangat keras maka retakan dapat mengakibatkan pecahnya plat.

Pembentukan adiabatic shear band dan retak, pengamatan pembentukan retak perlu dilakukan pada plat yang tidak tertembus proyektil. Walaupun plat dapat menahan beban proyektil

namun perlu diperiksa pula keberadaan retak. Keberadaan retakan sangat penting dalam menilai kualitas plat setelah terkena tumbukan proyektil. Plat dengan sisa retakan akan memiliki umur pakai yang lebih rendah dibanding dengan plat yang tidak memiliki retak. Gambar 9. menunjukkan besar retak yang terjadi pada plat A.2 dan plat A.3. Pada plat A.2 nampak adanya retak di permukaan sepanjang + 3 mm. Pada plat A.3 nampak adanya retak dengan jumlah yang banyak sepanjang 0,72 mm, 0,32 mm dan 0,15 mm. Serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Edwards MR (1997) yang melakukan penelitian balistik menggunakan plat berbahan tool steel dengan kekerasan 380 VHN, 510 VHN dan 710 VHN. Edwards MR (1997) menunjukkan pada kekerasan diatas 510 VHN terjadi gross cracking (retakan yang banyak) yang menurunkan performansi balistik.



Gambar 9. Retak pada permukaan plat A.2 dan A.3



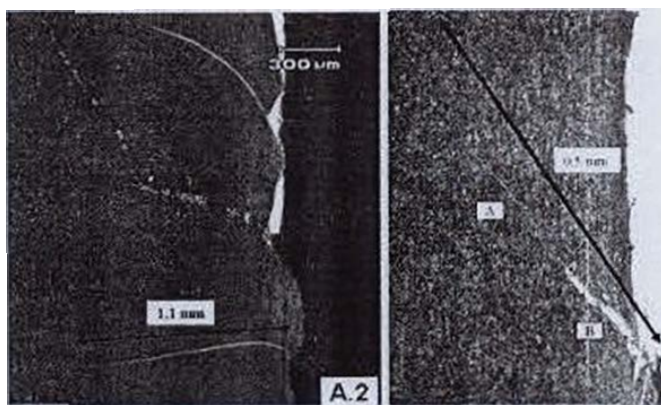
Gambar 10. Retak pada plat B.1

Gambar 10. menunjukkan permukaan plat B.1. Tidak terdeteksi adanya cacat dalam bentuk retakan. Dari sini dapat disimpulkan bahwa plat B.1 memiliki performansi yang lebih baik dibanding plat A.2 dan plat A.3.

Plat B dengan kekerasan berlapis memiliki keunggulan dalam menyerap energi dalam bentuk deformasi plastis. Pada Gambar 10. Sebelah kiri terlihat adanya lapisan yang berwarna lebih hitam di permukaan plat. Bagian tersebut menunjukkan daerah yang lebih keras sementara bagian belakang yang berwarna lebih terang menunjukkan daerah yang lebih lunak.

Lapisan keras terlihat melengkung menunjukkan bahwa bagian tersebut mengalami deformasi dan karena bagian bel. akanglebih lunak maka deformasi yang terjadi masih dapat diserap oleh bagian belakang dengan perubahan bentuk tanpa menghasilkan retakan. Sementara pada plat monolitik dengan kekerasan tinggi memiliki kekerasan yang merata sepanjang ketebalan plat. Plat yang memiliki kekerasan tinggi tidak mampu berdeformasi. Akibatnya energi yang diserap tidak diterima dalam bentuk deformasi plastis namun menghasilkan retakan pada permukaan.

Selain retak perlu diamati juga pembentukan *adiabatic shear band* (ASB) pada semua plat. Dey (2004) mengatakan Semakin keras material maka bentuk ASB akan semakin jelas dan berwarna putih apabila di etsa nitrat. Gambar 11. menunjukkan adanya ASB pada plat A dan B. Pada plat A.2 nampak banyak terdapat ASB di permukaan tumbukan. Panjang ASB bervariasi, salah satunya diukur sepanjang 1,1 mm. Plat A.3 memiliki ASB dengan ukuran yang lebih pendek yaitu sebesar 0,5 mm. Pada plat B.1 terdapat ASB dengan ukuran yang lebih pendek dibandingkan plat A.2 dan plat A.3 yaitu sebesar 66 mikron. Pembentukan ASB merupakan bentukan dari adanya tegangan geser pada material. Tegangan geser pada dasarnya memberikan deformasi pada plat di daerah yang sempit.



Gambar 11. Adiabatic shear band pada plat A.2, A.3 dan B.1

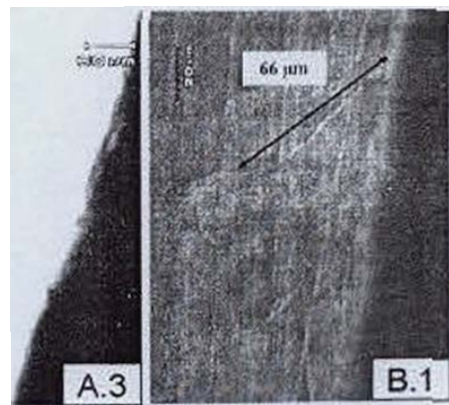
Pembentukan retakan dapat diawali dengan pembentukan *adiabatic shear band*. Wright (2002) mengatakan daerah ASB merupakan daerah pemicu kegagalan material baja yang

keras, dimulai dengan adanya void atau retakan di sepanjang ASB, lihat Gambar 12. Void muncul akibat adanya keberadaan tegangan tarik pada daerah ASB pada saat masih dalam kondisi panas dan lunak atau temperatur yang terjadi sangat tinggi sehingga mencapai temperatur cair material. Retakan muncul akibat tegangan mencapai nilai tegangan kritis daerah ASB dan terjadi pada kondisi ASB telah mendingin dan mengeras sehingga menjadi getas dan mudah retak.



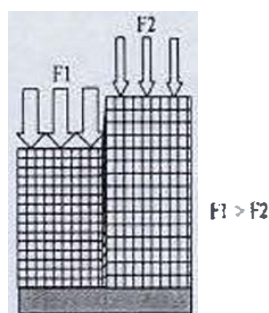
Gambar 12. Void pada adiabatic shear band teramati di sampel A.2

Gambar 13. menunjukkan pandangan atas permukaan bekas tumbukan. Nampak bentuk undakan atau tangga. Bentukan tangga terjadi akibat gaya yang terjadi tidak sama besar, bagian



yang terkena beban lebih besar mengalami penurunan lebih dalam. Adapun penyebab perbedaan pembebanan tersebut berkaitan dengan bentuk proyektil yang berujung tajam/oval atau tidak rata. Bila pada material sama sekali

tidak terjadi deformasi maka ASB pun akan sulit terbentuk. Semakin keras plat maka semakin sempit daerah terkena geseran dan semakin sulit untuk mengalami geseran. Dapat dilihat bahwa ukuran ASB semakin pendek dengan semakin kerasnya plat. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11, plat A.2 memiliki kekerasan 527 VHN panjang ASB 1,1 mm, plat A.3 memiliki kekerasan 677 VHN memiliki panjang ASB 0,5 mm dan plat B.1 memiliki kekerasan permukaan 795 VHN memiliki panjang ASB 60 mikron.



Gambar 13. Adiabatic shear band terhentuk karena adanya tegangan geser

Bila material sangat keras maka yang terjadi adalah langsung munculnya retakan dan material akan pecah. Hal itu terjadi karena semakin keras material maka material akan rentan membentuk retak. Material yang semakin keras akan memiliki sifat semakin getas sehingga perambatan retak akan sangat mudah terjadi yang berakibat kepada pecahnya plat.

Performansi Balistik, plat B.1 yang memiliki kekerasan berlapis memiliki kerusakan yang lebih kecil tanpa adanya retakan dibandingkan dengan semua plat A dengan kekerasan monolitik. Plat B.2 yang memiliki kekerasan lebih tinggi dibanding plat B.1 mengalami pecah. Semakin keras material maka cenderung akan menghasilkan retakan akibat semakin sensitifnya pembentukan adiabatic shear band dan retak. Kemudian semakin keras material maka ketahanan dalam menghambat laju retakan semakin rendah. Oleh karena itu bila material terlalu keras kerusakan yang paling parah mungkin terjadi adalah pecahnya plat akibat rambatan retakan. Sampel B.1 memiliki permukaan yang keras memberikan kontribusi dalam menahan energi balistik untuk dikembalikan ke proyektil sehingga sebagian besar energi digunakan untuk menghancurkan proyektil atau memantulkan proyektil. Bagian belakang yang tidak terlalu keras memiliki kontribusi dalam menghambat rambatan retak, sehingga tidak terbentuk retakan yang memanjang.

Tabel 3. Performansi balistik

Plat	Kekerasan	Diameter	Profil Kerusakan	
			Kedalaman	Jenis
Monolitik A.1	44 VHN	10 mm		Lubang Tembus
Monolitik A.2	527 VHN	7 mm	0.74 mm	Retak permukaan (3mm) ASB (1.1mm)
Monolitik A.3	677 VHN	3 mm	0.22 mm	Retak permukaan (0.72mm, 0.32 mm dan 0.15 mm) ASB (0.5 mm)
Berlapis B.1	795-524 VHN (0.8 mm) + 524 VHN (7.2 mm)	2 mm	0.19 mm	Tanpa Retak ASB (66 μm)
Berlapis B.2	1119-643 VHN (0.8 mm) + 643 VHN (7.2 mm)			Pecah

Tabel 3. menunjukkan perbandingan performansi balistik semua plat yang telah diuji. Plat B.1 dengan kekerasan berlapis memiliki performansi balistik yang paling baik. Plat B.1 mampu menahan beban tumbukan proyektil kaliber 5,56 mm berinti lunak dengan kecepatan 930 m/s. Kerusakan yang ditimbulkan yaitu kawah berdiameter 2 mm dengan kedalaman 0,19 mm, terdapat ASB dengan panjang 66 mikron namun tidak terdapat retak. Dapat ditarik kesimpulan bahwa plat B.1 memiliki performansi yang paling baik dibandingkan dengan plat lainnya.

KESIMPULAN

Model lapisan dengan struktur kekerasan kontinyu dan gradual merupakan hal yang sebelumnya tidak dilakukan oleh peneliti lain. Proses pembuatan Dual Hardness Armor yang telah dilakukan sebelumnya menggunakan metode rolled bonding, induction heat-treatment dan electroslag remelting yang relatif mahal. Melalui penelitian ini dibuktikan bahwa penambahan profil kekerasan gradual yang lebih keras pada permukaan bahan plat baja AISI 4340 dengan metode carburizing dapat meningkatkan ketahanan balistiknya. Metode karburisasi yang digunakan cukup efektif dan mudah diproses untuk mendapatkan struktur dengan kekerasan berlapis gradual. Simulasi yang dilakukan telah pula banyak membantu dalam melakukan pre-analisis dan prediksi terhadap performa balistik plat sebelum dilakukan eksperimen. Simulasi merupakan langkah yang efisien dalam menunjang pelaksanaan penelitian.

Secara umum dapat disimpulkan bahwa struktur plat AISI 4340 dengan kekerasan berlapis yang kontinyu dapat meningkatkan performansi balistiknya. Hal ini terbukti dimana dimensi kerusakan plat dapat dikurangi dan tidak terdapat retak di bagian permukaan atau dalam. Sementara pada plat dengan kekerasan monolitik menghasilkan kerusakan yang lebih besar dan disertai adanya retak.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, R. dan Loveday, G. (1969) : Production Feasibility of Rolled Bonded Dual Hardness Steel Armor Plate, AMMRC CR 68-14(F), U.S Steel Corporation.
- Borvik, T et al, 1999, "Ballistic penetration of steel plate", *Int. J. Impact Engng* Vol. 22, Pp. 855-3886
- Buchar, J et al. 2002, "Ballistic Performance of Dual Hardness Steel", 20th International Symposium of Ballistic, Orlando, FL.
- Dey, S et al, 2004, "The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes", *Int. J. Impact Engng* Vol. 30, Pp. 1005-1038,
- Dieter, George, E. , 1976, "Mechanical Metallurgy", 2nd Ed., McGraw-Hill
- Dikshit S. N. et al., 1995, "The Influence of Plate Hardness on The Ballistic Penetration of Thick Steel Plates", *Int. J. Impact Engng* Vol. 16, No. 2, pp. 293-320.
- Duan, Z Q et al., 2003, "Microstructure and Adiabatic Shear Bands Formed by Ballistic Impact in Steels and Tungsten Alloy", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 26, 1119-1126.
- Edwards, M.R. dan Mathewson, A. (1997) : Finite Element Modeling of the Formation of Adiabatic Shear Bands in AISI 4340 Steel, *Int. J. Impact Engng*, 19 (4), 297-309.
- Gooch, W., Burkins, M., Mackenzie, D. dan Vodenicharov, S. (2005) : Ballistic Analysis of Bulgarian Electroslag Remelted Dual Hard Steel Armor Plate, 22nd International Symposium on Ballistic, Vancouver, Canada.
- Kleponis, David S. et al., 2000, "Material Design Paradigms for Optimal Functional Gradient Armors"

Montgomery, J.S. (2004) : Protecting the Future Force: A New Generation of Metallic Armors Leads the Way, AMPTIAC Quarterly, 8 (4).

Özel, Tuğrul , 2004, "Finite Element Method Simulation of Machining of AISI 1045 Steel With A Round Edge Cutting Tool

Richard, J.S. (1996) : Induction Heat Treatment – Phase I – Technology to Produce Monolithic Gradient Hardness Steel Armor, US Army Research Laboratory Report.

Sliney, J. (1965) : Dual Hardness Steel Armor, AMRA TR, 65-13.

Teng, X., Wierzbicki, T. dan Huang, M. (2008) : Ballistic Resistance of Double-Layered Armor Plates, International Journal of Impact Engineering, 35 , 870–884