

# PERILAKU BALISTIK BAJA KOMERSIAL SCR 440 DENGAN KEKERASAN BERLAPIS (DUAL HARDNESS) DALAM SIMULASI DAN EKSPERIMEN

**Beny Bandanadjaja<sup>1</sup>, Arif Basuki<sup>2</sup> dan Mardjono Siswosuwarno<sup>2</sup>**

Peserta Program Doktor Teknik Material <sup>1)</sup>

Staf Kelompok Keahlian Ilmu & Material <sup>2)</sup>

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara – Institut Teknologi Bandung

Gedung Labtek II Lantai 2, Jl. Ganesa 10 Bandung 40132

Email : benybj@yahoo.com<sup>1)</sup>, arifbasuki@material.itb.ac.id<sup>2)</sup>, mardjono@melsa.net.id <sup>3)</sup>

## ABSTRAK

*Beban balistik adalah beban tumbukan yang dikenakan pada suatu material dalam kecepatan sangat tinggi (hypervelocity impact). Sedemikian sangat tingginya kecepatan yang terjadi sehingga beberapa pendataan dan pengamatan dalam eksperimen cukup sulit dilakukan, perlu peralatan khusus yang harganya cukup mahal. Simulasi komputer merupakan metode yang cukup efisien untuk melakukan pra-analisis dan melihat beberapa fenomena yang sulit direkam dalam eksperimen. Penelitian ini dilakukan dalam bentuk simulasi dan eksperimen. Tujuannya untuk melihat pengaruh variasi kekerasan yang diberikan pada baja bila diberi beban balistik. Dua lembar plat baja komersial jenis SCr 440 diproses sehingga memiliki kekerasan berbeda. Plat pertama memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibanding plat kedua. Kedua plat ditempelkan sehingga membentuk konfigurasi plat berlapis. Dimensi plat masing-masing sebesar 100x200 mm dengan ketebalan 5 mm. Proyektil yang digunakan memiliki kaliber 5,56 mm. Kecepatan tumbukkan antara proyektil dan plat sebesar 930 m/s. Arah tumbukkan diberikan dalam dua posisi, pertama ditumbuk dari pada posisi material keras didepan dan kedua ditumbuk dengan posisi sebaliknya. Simulasi dan eksperimen diperbandingkan dalam hal kerusakan yang terjadi keduanya menunjukkan bentuk kerusakan yang serupa. Dari simulasi dapat diamati animasi tumbukkan proyektil terhadap plat. Selain itu dapat dianalisis nilai serapan energi pada plat dan proyektil. Dari hasil eksperimen dapat dianalisis perubahan struktur mikro yang terjadi dan perubahan kekerasannya. Performansi balistik dinilai dari kerusakan yang terjadi. Kerusakan pada konfigurasi material lunak didepan lebih sedikit dibanding posisi sebaliknya. Disimpulkan performansi plat dengan posisi material lunak didepan lebih baik dibanding posisi material keras didepan.*

*Kata Kunci : Balistik, Dual Hardness, Baja SCr 440, Simulasi*

## PENDAHULUAN

Beban balistik merupakan pembebanan pada material dengan laju regangan yang sangat tinggi. Bentuk test balistik yang umum dikenal adalah dengan melakukan penembakan pada sampel logam menggunakan proyektil atau peluru berkecepatan tinggi. Ketahanan material logam terhadap beban balistik bergantung pada beberapa parameter. Parameter tersebut antara lain parameter proyektil (ukuran, bentuk, masa jenis dan kekerasan), parameter impak (kecepatan dan sudut) dan parameter target (kekerasan/kekuatan, keuletan, struktur mikro dan ketebalan).

Penelitian yang dilakukan oleh Dikshit [1994] mengenai balistik menunjukkan bahwa performansi balistik pada plat setebal 20 mm meningkat seiring

dengan meningkatnya kekerasan plat sampai pada level kekerasan 440 VHN. Diatas kekerasan optimal maka performansi balistik akan menurun. Hal tersebut dikarenakan semakin keras material maka semakin mudah pembentukan *adiabatic shear band (ASB)*. ASB tersebut memicu terjadinya penembusan (*plugging*) akibat tegangan geser. Selain kekerasan performansi balistik dapat ditingkatkan dengan menambah ketebalan plat. Namun pilihan untuk menambah ketebalan plat mengakibatkan penambahan berat plat yang digunakan. Pada aplikasinya penambahan berat tersebut berakibat pada ketidak-ekonomisan penggunaan plat. Buchar [2002] melakukan penelitian *dual hardness steel* yaitu susunan plat dengan menempatkan plat yang lebih keras didepan. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan lapisan keras dibagian depan akan meningkatkan

performansi balistik plat dibanding penggunaan plat monolitik. Performansi balistik meningkat berbanding lurus dengan penambahan ketebalan bagian keras sampai pada ketebalan 4 mm dari 5 mm tebal total, pada ketebalan bagian keras lebih dari 4 mm performansi balistik menurun. Kleponis [2000] melakukan simulasi balistik dengan melakukan variasi gradien lapisan kekerasan. Dari hasil simulasi Kleponis menyimpulkan bahwa konfigurasi gradien kekerasan dari lunak menuju keras lebih baik dibanding dari keras menuju lunak.

Dari kajian beberapa penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa konstruksi plat *dual hardness* merupakan konstruksi ideal untuk meningkatkan performansi balistik. Dengan ketebalan yang sama maka konstruksi *dual hardness* dapat memberikan performansi yang lebih baik dibanding konstruksi monolitik. Oleh karena itu maka dalam penelitian ini dilakukan analisis pengaruh variasi kekerasan target terhadap beban balistik. Kekerasan yang diteliti dalam bentuk *dual hardness*, yaitu konstruksi dua buah plat dengan ketebalan masing-masing 5 mm yang memiliki kekerasan tinggi dan pasangannya yang lebih rendah. Bahan yang digunakan adalah SCR 440. Tujuan penelitian untuk mengetahui performansi balistik plat dengan konstruksi *dual hardness*. Sejauh mana perbedaan performansi balistik bila plat disusun dengan susunan keras kemudian lunak dan sebaliknya.

## METODA PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan membuat simulasi dan eksperimen. Simulasi yang dilakukan adalah simulasi sebuah proyektil berkecepatan 930 m/s menumbuk 2 buah plat dengan ketebalan 5 mm yang disusun berlapis. Simulasi dilakukan pada 2 kondisi yaitu kondisi pertama plat keras diletakkan didepan sedangkan kondisi kedua plat lunak diletakkan didepan. Kekerasan plat keras sebesar 430 VHN sedangkan plat lunak sebesar 200 VHN. Eksperimen dilakukan dengan mengikuti kondisi yang ada pada simulasi. Hasilnya kemudian dibandingkan dan dianalisis.

Dalam pembebanan balistik laju regangan yang terjadi sangat tinggi, oleh karenanya maka muncul pengaruh *hardening* dan *softening*. Dalam simulasi model material menggunakan persamaan Johnson-Cook. Pemodelan Johnson-Cook melibatkan efek *strain hardening*, *strain rate hardening* dan *thermal softening*.

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n)(1 + \dot{\varepsilon}_{eq}^*)^C(1 - T^{*m}), \quad (1)$$

Keterangan :

$\sigma_{eq}$  = Tegangan ekuivalen

A = Tegangan luluh ( $\sigma_y$ ) [MPa]

B = Konstanta *strain hardening parameter* [Mpa]

n = Koefisien *strain hardening*

C = *Strain rate parameter*

m = Parameter *temperature softening*

$\varepsilon_{eq}$  = Akumulasi regangan plastis

Laju regangan non dimensional

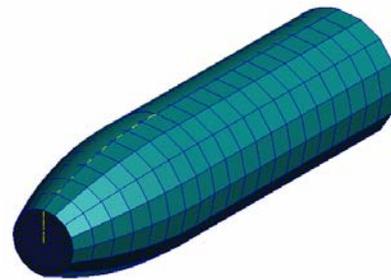
$$\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_0 \quad (2)$$

$\varepsilon_0$  = laju regangan referensi

$$T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room}) \quad (3)$$

Kriteria kegagalan elemen ditentukan dengan memasukkan nilai regangan plastis maksimum ( $\varepsilon_p$ ). Artinya apabila elemen mengalami regangan sampai batas nilai regangan plastis maksimum maka elemen tersebut akan dihapus oleh sistem.

Pemodelan proyektil dan plat dilakukan menggunakan bentuk 3D. Meshing yang digunakan menggunakan elemen hexa. Model proyektil seperti yang digambarkan pada gambar 1 proyektil berdiameter 5,6 mm dengan panjang total 20,9 mm. Berat proyektil sebesar 3,99 gram.



Gambar 1. Model proyektil

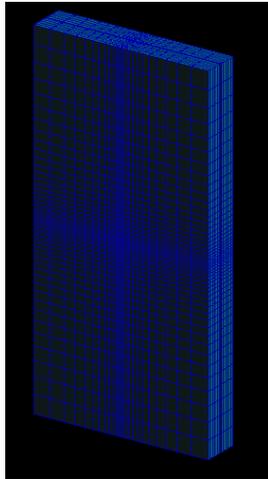
Kecepatan awal proyektil diberikan sebesar 930 m/s pada arah transversal sedangkan pada arah rotational dibuat tidak berputar.

Proyektil yang digunakan menggunakan bahan kuningan. Sifat-sifat bahan di masukan seperti yang diuraikan pada tabel 1 sebagai berikut:

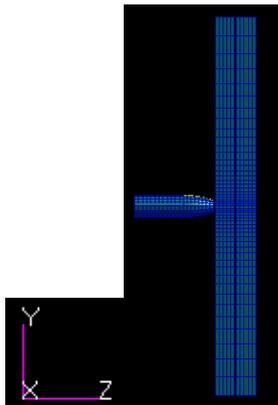
Tabel 1. Sifat Bahan Proyektil

Sifat Material	Simbol	Brass
Density	$\rho$	8520 kg/m <sup>3</sup>
Elastic modulus	E	115 GPa
Poisson ratio	$\nu$	0.307
Shear modulus	$\mu$	44 GPa
Bulk modulus	K	61 GPa
Static yield stress	A	112 MPa
Hardening parameter	B	505 MPa
Hardening exponent	n	0.42
Strain rate parameter	C	0.009
Temperature exponent	m	1.68
Reference strain rate		1
Specific heat	Cp	385 J/kg/K
Melting temp.	Tm	1189 K
Room temperature	Tr	298 K
Max. plastic strain	$\varepsilon_p$	0.5

Plat dimodelkan dalam bentuk 3D dengan meshing menggunakan elemen hexa seperti yang terlihat pada gambar 2a dan 2b. Dimensi plat 100x200 mm dengan ketebalan 5 mm. Plat disusun menjadi dua lapisan, plat pertama dibuat keras dan plat kedua lebih lunak. Sekeliling plat dibuat tumpuan sehingga plat tidak bebas dalam arah transversal dan rotational. Perbedaan kekerasan plat diberikan dengan memberikan variasi pada nilai A,B,n dan  $\epsilon_p$  seperti yang ditunjukkan pada tabel 2. Sifat plat yang serupa juga dimasukkan seperti pada tabel 3.



Gambar 2a. Model Plat



Gambar 2b. Model Plat

Tabel 2. Sifat Plat untuk Membedakan Kekerasan

Sifat Material	Simbol	Keras 430 VHN	Lunak 200 VHN
Static yield stress [Mpa]	A	1120	280
Hardening parameter	B	880	220
Hardening exponent	n	0,1	0,36
Max. plastic strain	$\epsilon_p$	0,11	0,4

Tabel 3. Sifat Plat yang Sama

Sifat Material	Simbol	Nilai
Density	$\rho$	7890 kg/m <sup>3</sup>
Elastic modulus	E	200 GPa
Poisson ratio	$\nu$	0.3
Shear modulus	$\mu$	80 GPa
Bulk modulus	K	169 GPa
Strain rate parameter	C	0.022
Temperature exponent	m	1
Reference strain rate		1
Specific heat	Cp	452 J/kg/K
Melting temp.	Tm	1811 K
Room temperature	Tr	298 K

Dalam simulasi perlu didefinisikan kontak antar proyektil dan plat. Model kontak menggunakan sistem *adaptive master and slave*. Sistem adaptif menghasilkan kondisi elemen terluar sebagai permukaan kontak. Dengan demikian kontak antara plat dan proyektil dapat selalu terjadi. Proyektil dianggap sebagai *master* sementara plat sebagai *slave*. Untuk menguji hasil simulasi maka dilakukan eksperimen uji tembak terhadap plat SCr 440. Eksperimen dilakukan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

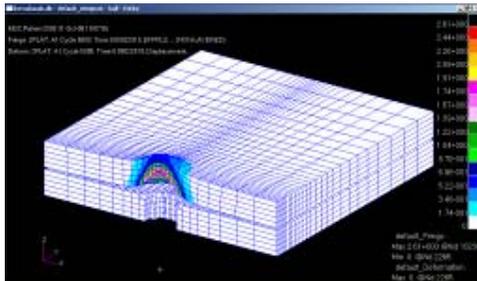
Plat baja SCr 440 dipotong dengan ukuran 100x200x5 mm. Dua buah plat kemudian diberikan perlakuan panas dengan temperatur pemanasan 900° C dan waktu penahanan 12 jam. Pendinginan kedua plat dibedakan satu plat didinginkan dengan mencelupkan kedalam air disebut sampel A12. plat yang lain didinginkan dengan pendinginan udara bebas, disebut sampel U12.

Hasil pengujian kekerasan menunjukkan hasil yang tidak sama untuk daerah permukaan dan bagian dalam. Untuk sampel A12 diperoleh kekerasan rata-rata 430 VHN dan untuk sampel U12 kekerasan rata-rata 200 VHN.

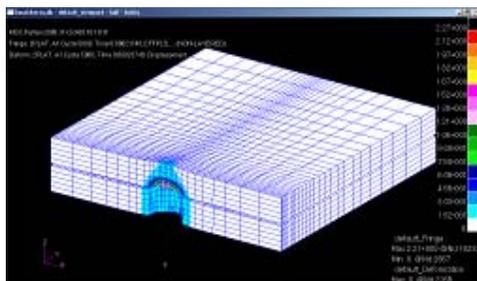
Langkah selanjutnya adalah menyusun kedua plat dengan cara ditempelkan dan dilakukan pengujian tembak menggunakan peluru kaliber 5,56 mm berinti lunak. Penembakan pada jarak 10 m dari target. Kecepatan penembakan sebesar 930 m/s. Penembakan dilakukan dua kondisi yaitu pada susunan plat keras didepan (susunan A12-U12) dan plat lunak didepan (susunan U12-A12). Plat yang telah ditembak kemudian dipotong menggunakan *wirecut* melintang pada daerah penembakan. Kemudian dilakukan karakterisasi pemeriksaan metalografi dan pengujian kekerasan mikro.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

*Simulasi*

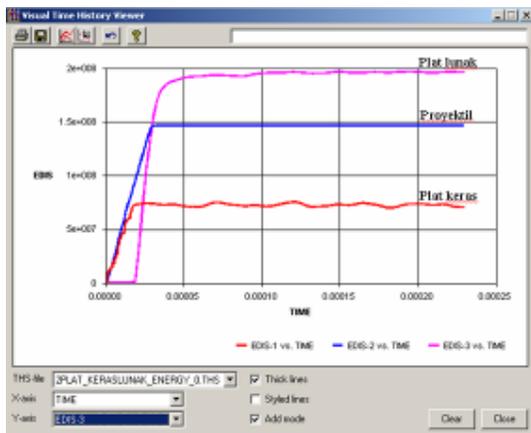


Gambar 3. Potongan Melintang Hasil Simulasi Dengan Susunan Keras-Lunak A12-U12

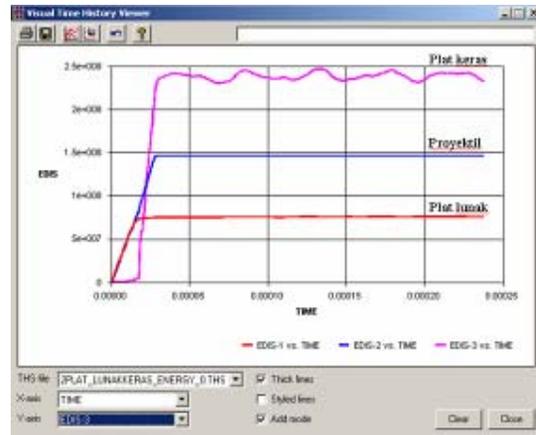


Gambar 4. Potongan Melintang Hasil Simulasi Dengan Susunan Lunak-Keras U12-A12

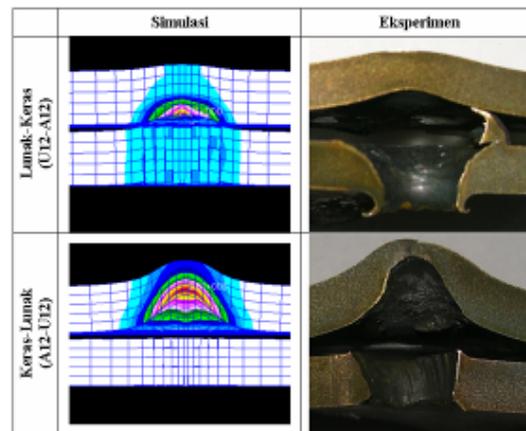
Gambar 3 dan 4 menunjukkan hasil simulasi dilihat pada potongan melintang sampel. hasilnya menunjukkan bahwa deformasi pada konfigurasi lunak-keras lebih baik dibanding konfigurasi keras-lunak.



Gambar 5. Energi Distorsi Susunan Keras-Lunak A12-U12



Gambar 6. Potongan Melintang Hasil Simulasi Dengan Susunan Lunak-Keras U12-A12

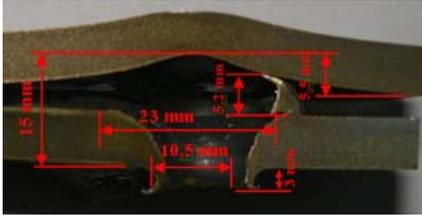


Gambar 7. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen

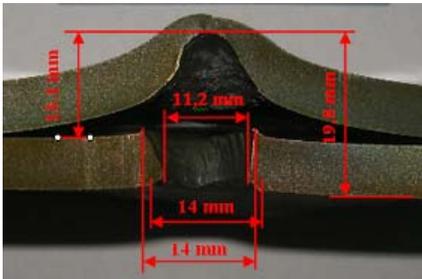
Gambar 7 menunjukkan perbandingan hasil simulasi dan eksperimen. Terlihat di gambar hasil simulasi relatif serupa dengan hasil eksperimen. perbedaan terdapat pada deformasi yang terjadi pada eksperimen terlihat lebih besar dibanding simulasi

**Eksperimen**

Secara makro dapat terlihat bahwa hasil penembakan plat dengan posisi plat lunak didepan (susunan U12-A12) menunjukkan hasil yang lebih baik. Pada gambar 8 dapat dilihat kedalaman kerusakan pada plat bagian belakang sebesar 5,5 mm. Plat lunak di bagian depan berfungsi sebagai penyerap energi impact yang ada pada proyektil. Energi sisa yang tersedia cukup sedikit untuk dapat merusak plat keras dibagian belakang.



Gambar 8. Potongan Melintang Hasil Penembakan Dengan Susunan U12-A12



Gambar 9. Potongan Melintang Hasil Penembakan Dengan Susunan A12-U12

Pada susunan plat keras (susunan A12-U12) di depan menunjukkan hasil yang lebih buruk, kedalaman kerusakan bagian belakang yang terjadi sebesar 13,1 mm (lihat gambar 9). Plat keras di bagian depan tidak banyak menyerap energi impact proyektil. Pembentukan *adiabatic shear band* pada plat keras memicu terbentuknya retakan sepanjang band dan menghasilkan patah akibat retakan.

Secara mikro dapat dilihat bahwa adanya pembentukan *adiabatic shear band* pada plat keras untuk susunan plat keras di depan (A12-U12). Jenis *adiabatic shear band* yang terbentuk adalah jenis *transformed band*, terlihat dengan warna putih yang berbeda dibanding struktur mikro disekelilingnya. *Transformed band* memiliki kekerasan yang tinggi sehingga rentan untuk menjadi retak.

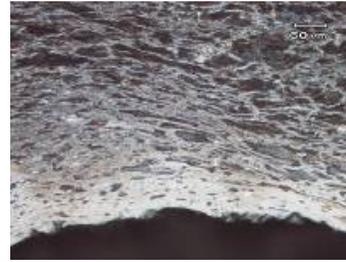
*Adiabatic shear band* terlihat sepanjang garis tepi bagian plat yang berlubang (lihat gambar 10). Hal itu menunjukkan bahwa sebelum terjadi pelubangan oleh proyektil maka terbentuk *adiabatic shear band* terlebih dahulu kemudian muncul retakan sepanjang band dan akhirnya terjadi pelubangan.



Gambar 10. Struktur Adiabatic Shear Band Pada Sampel A12 Susunan A12-U12

Pada plat belakang yang lebih lunak mengalami deformasi yang sangat besar, seperti yang terlihat pada gambar 11 struktur mikro terlihat pipih. Hal itu menunjukkan bahwa energi impact yang tersisa masih

cukup besar sehingga memberikan deformasi yang cukup besar pada plat belakang.



Gambar 11. Struktur Terdeformasi Pada Sampel U12 Susunan A12-U12

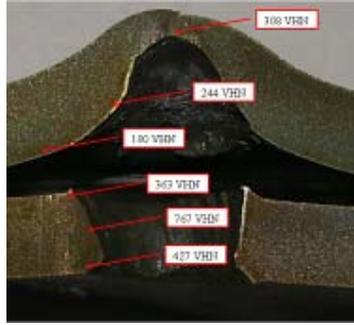


Gambar 12. Struktur *Adiabatic Shear Band* Pada Sampel U12 Susunan U12-A12

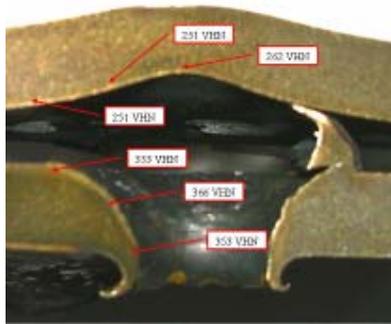


Gambar 13. Struktur Mikro Pada Sampel A12 Susunan U12-A12

Berbeda dengan hal diatas *adiabatic shear band* juga terlihat di plat lunak pada susunan plat lunak didepan (U12-A12). *Adiabatic shear band* yang terbentuk berbeda dengan yang ada di plat keras, *adiabatic shear band* seperti yang digambarkan pada gambar 12 terbentuk dengan jenis *deformed band*, terlihat dengan adanya garis-garis deformasi disepanjang *adiabatic shear band*. Disekeliling *adiabatic shear band* juga terlihat adanya sisa-sisa proses deformasi yang mendahului terbentuknya *adiabatic shear band* tersebut. Terlihat dengan adanya struktur yang menjadi pipih. Adanya proses deformasi itulah yang menghasilkan penyerapan energi yang lebih besar. Pada bagian belakang yang lebih keras tidak terlalu terlihat adanya deformasi, dapat dilihat pada struktur mikro yang terjadi tidak menunjukkan banyak perubahan (gambar 13).



Gambar 14. Kekerasan Mikro Pada Susunan A12-U12



Gambar 15. Kekerasan Mikro Pada Susunan U12-A12

Perubahan kekerasan pada permukaan plat diukur untuk mengetahui seberapa besar peningkatan kekerasan yang terjadi. Peningkatan kekerasan menunjukkan terjadinya proses strain hardening. Akibat adanya strain hardening maka kekuatan menjadi meningkat. Semakin besar peningkatan kekerasan menunjukkan semakin tinggi tingkat strain yang diterima plat, itu artinya semakin besar energi yang diserap oleh plat untuk proses deformasi dan strain hardening. Gambar 14 dan 15 menunjukkan kekerasan pada beberapa posisi di sekitar kerusakan.

Tabel 4. Prosentase Perubahan Kekerasan Mikro Pada Susunan A12-U12

	AWAL (VHN)	AKHIR (VHN)	% PERUBAHAN
A12 (Keras)	250	427	71%
U12 (Lunak)	112	308	175%

Tabel 5. Prosentase Perubahan Kekerasan Mikro Pada Susunan A12-U12

	AWAL (VHN)	AKHIR (VHN)	% PERUBAHAN
U12 (Lunak)	112	353	215%
A12 (Keras)	250	262	5%

Dari hasil pengujian kekerasan dapat dibandingkan kondisi awal sebelum ditembak dan kondisi akhir setelah ditembak. Data yang diambil untuk perbandingan adalah data kekerasan permukaan masing-masing plat. Hasilnya seperti yang ditabelkan pada tabel 4 dan tabel 5.

Pada susunan plat keras didepan peningkatan kekerasan yang terjadi pada plat keras sebesar 71% sedangkan plat lunaknya sebesar 175% (lihat tabel 4). Hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi serapan energi pada plat keras didepan cukup sedikit akibatnya sisa energi impact lebih banyak diberikan pada plat lunak dibelakangnya. Terlihat dengan penambahan nilai kekerasan yang lebih tinggi pada plat lunak.

Pada susunan plat lunak didepan peningkatan kekerasan yang terjadi pada plat lunak sebesar 215% sedangkan plat keras dibelakangnya sebesar 5% (lihat tabel 5). Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi impact telah diserap oleh plat lunak di depan dalam bentuk deformasi plastis yang berakibat terjadinya peningkatan kekerasan. Sedangkan plat keras dibelakangnya hanya menerima sisa energi impact yang relatif sedikit, terbukti dengan sedikitnya pertambahan kekerasan.

### KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa posisi keras dan lunak pada konstruksi susunan plat baja *dual hardness* berpengaruh terhadap performansi balistiknya. Dari kerusakan yang terjadi dan analisis serapan energi maka dapat disimpulkan bahwa konstruksi dual hardness dengan posisi lunak di depan dapat menghasilkan performansi balistik yang lebih baik. Kondisi tersebut berlaku pada susunan dengan ketebalan plat masing-masing 5 mm dengan total tebal sebesar 10 mm. Pada kondisi dengan ketebalan plat yang berbeda hasil yang diperoleh bisa jadi berbeda.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Borvik, T et al.1999. Ballistic Penetration of Steel Plates. *Int. J. Impact Engng* Vol. 22. Pp. 855-3886.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Buchar, J et al.2002.Ballistic Performance of Dual Hardness Steel. *20<sup>th</sup> International Symposium of Ballistic*, Orlando, FL.
- [5] Kleponis, David S. et al. 2000. Material Design Paradigms for Optimal Functional Gradient Armors.
- [6] Duan, Z Q et al. 2003.Microstructure and Adiabatic Shear Bands Formed by Ballistic Impact in Steels and Tungsteen Alloy. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 26, 1119-1126.
- [7] Dieter, George, E.1976.*Mechanical Metallurgy*, 2nd Ed., McGraw-Hill.