

Pembuatan Pelat Baja untuk Material Tahan Peluru untuk Kendaraan Tempur

Rusnaldy^{a,*}, Sri Nugorho^a, Ismoyo Haryanto^a, Herlangga^a, Jill Anastasia^a dan Febby Arifin^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: rusnaldy@yahoo.com

Abstract

In the present study, five steels with different chemical compositions were made by casting process followed by forging and heat treatment processes. Samples of 180 x 180 x 8 mm were cut from the heat treated plate and were used to evaluate the ballistic performance of these steel plates by impacting against a 5.56 mm steel projectile at 900 m/s at normal angle of attack from a distance of 25 m. Experimental results showed that the best ballistic performance was attained with the steels which have the highest hardness.

Keywords: Ballistic performance; steels; casting process; forging process; heat treatment process

Abstrak

Pada studi ini, 5 baja dengan komposisi kimia yang berbeda dibuat melalui proses pengecoran yang diikuti dengan proses tempa dan perlakuan panas. Sampel berdimensi 180 x 180 dan 8 mm diambil dari pelat baja yang telah mengalami proses perlakuan panas dan akan digunakan untuk mengevaluasi perilaku balistik dari baja-baja tersebut dengan cara ditembak peluru baja berkaliber 5,56 mm dengan kecepatan tembak 900 m/s dari sudut normal pada jarak 25 m. Hasil percobaan menunjukkan bahwa performan balistik terbaik diperoleh pada baja dengan kekerasan tertinggi.

Kata kunci: Performan balistik, baja, proses pengecoran, proses tempa, proses perlakuan panas

1. 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. Para peneliti lain di dunia berusaha mencari material-material non baja yang ringan namun memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan impak dan penetrasi dari peluru. Namun kebutuhan material tahan peluru untuk kendaraan tempur seperti tank, masih sangat membutuhkan baja sebagai material tahan pelurunya. Upaya untuk memperingan atau membuat lebih tipis adalah kajian utama oleh para peneliti saat ini.

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 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 [1]. Hasilnya terlihat bahwa dengan bertambahnya ketebalan baja kemampuan melakukan penetrasi dari proyektil menjadi berkurang.

Palleti dkk. 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 [2]. Ketahanan balistik baja ini dapat ditingkatkan jika ketebalan baja ditambah. Pengaruh ketebalan pada baja juga diuji oleh Durmus dkk [3]. Mereka menggunakan baja pelat hasil pengerolan dingin dengan ketebalan 1 dan 2 mm yang 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, analisa dengan melakukan simulasi juga banyak dilakukan. Salah satunya seperti yang dilakukan oleh Kilic & Ekici [4]. Mereka melakukan simulasi ketahanan balistik baja jenis 500 HB armor steel yang ditembak peluru dari baja yang dikeraskan berkaliber 7,62 mm dengan membuat model 3D kemudian memvalidasinya 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. membandingkan ketahanan balistik dari aluminium jenis Al 7075 dan baja *high strength low alloy steel* AISI 4140 [5]. 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.

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 oleh beberapa peneliti [6-12]. Chen dan Medina meneliti pengaruh bentuk proyektil pada ketahanan impak dengan kecepatan tinggi pada komposit B/Al [7]. 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*. Ulven dkk. juga meneliti bentuk proyektil pada ketahanan balistik panel dari material komposit jenis *carbon/epoxy* [12]. Mereka menggunakan bentuk proyektil *hemispherical*, *conical*, *fragment simulating* dan *flat*. 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 [6]. 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 juga memberikan efek balistik yang berbeda-beda.

Penelitian awal untuk memahami ketahanan peluru dari suatu pelat baja telah dilakukan penulis. Percobaan menggunakan pelat baja tipis dengan tebal 0,2 mm dan 0,4 mm. Material target tersebut ditembakkan dengan 4 peluru berdiameter 4,5 mm dengan bentuk hidung yang berbeda-beda dengan kecepatan dan jarak tembak yang berbeda. Senapan yang digunakan untuk menembakkan peluru-peluru tersebut adalah jenis senapan angin. Hasil yang diperoleh tidak berbeda jauh dengan hasil penelitian yang telah diuraikan di atas, hanya saja peluru yang digunakan lebih kecil dan pelat yang lebih tipis [13].

Kemudian penelitian berikutnya menggunakan peluru yang paling keras diantara keempat peluru yang digunakan, yaitu peluru baja dengan bentuk hidung ogival menggunakan pelat baja tipis dengan tebal 0,2 dan 0,4 mm. Ada tiga macam jumlah lapisan yang digunakan yaitu, lapisan tunggal, ganda dan triple. Diteliti juga pengaruh adanya celah di antara lapisan-lapisan tersebut. Kecepatan tembak yang digunakan adalah konstan (184,4 m/s) berjarak tembak 2 m dengan menggunakan senapan angin komersial. Dari data yang diperoleh terlihat bahwa semakin tebal lapisan yang digunakan akan semakin baik ketahanan balistiknya. Ketahanan balistik untuk lapisan triple akan lebih baik jika baja yang lebih tebal diletakkan di bagian depan sementara yang lebih tipis diletakkan di bagian belakang. Adanya celah di antara lapisan baja juga dapat memperbaiki ketahanan balistiknya [14].

Langkah berikutnya adalah dengan menggunakan material baja ASTM A36 dari jenis baja karbon rendah dengan tebal 2 mm yang ditembakkan dengan peluru yang sama dengan senapan angin komersial yang sama pada percobaan sebelumnya. Fasa yang dominan dari baja ini adalah ferit. Dari hasil uji tembak dengan parameter yang sama dengan percobaan sebelumnya, baja tidak mengalami kerusakan yang berarti. Kedalaman dan volume *crater* yang dihasilkan sulit untuk diukur. Tetapi deformasi berlebihan terjadi pada peluru yang ditembakkan. Dari hasil ini diputuskan untuk mengganti peluru dengan diameter yang lebih besar yang tersedia di pasaran. Pistol dari jenis *air soft gun* dapat digunakan untuk menembakkan peluru berdiameter lebih besar, yakni 6 mm. Peluru tersebut berbentuk bola. Namun kecepatan maksimal yang dapat dihasilkan lebih kecil dari senapan angin, yakni sebesar 128 m/s. Percobaan kemudian dilakukan dengan menggunakan material target ASTM A36 dengan jarak tembak 1, 2, dan 3 m. Hasilnya tidak ada satupun material target yang mampu ditembus peluru. Namun material target yang ditembakkan dari jarak 1 m memiliki kedalaman dan volume crater yang lebih besar dibanding jarak yang lainnya [15]. Sehingga jarak tembak 1 m dijadikan sebagai acuan untuk melakukan percobaan selanjutnya.

Percobaan berikutnya menggunakan baja lain dengan fasa yang berbeda-beda. Fasa ferit diperoleh dari baja ASTM A36, fasa perlit diperoleh dari jenis baja AISI 1045, fasa austenit diperoleh dari jenis baja stainless steel SS304, fasa bainit dan martensit diperoleh dengan melakukan proses perlakuan panas baja AISI 1045 yang kemudian dicelup di udara dan dalam air. Tebal semua material baja adalah 2 mm. Peluru yang digunakan adalah peluru baja berbentuk bola dengan diameter 6 mm. Untuk meningkatkan kekekerasannya, peluru tersebut kemudian juga dilakukan proses perlakuan panas dan dicelup ke dalam air. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa hampir semua material target tidak dapat ditembus oleh peluru. Kedalaman dan volume crater terbesar terjadi pada material baja berfasa ferit. Sementara pada baja yang berfasa martensit crater yang terbentuk sangatlah dangkal, sehingga sulit dilakukan pengukuran kedalaman dan volumenya. Hal ini mengindikasikan bahwa baja dengan fasa martensit memiliki ketahanan balistik yang baik. Pada baja yang berfasa austenit, seperti pada jenis stainless steel SS304, pada area yang terdeformasi pada crater ditemukan adanya *deformed band*. Hal ini tidak ditemui pada jenis baja yang lain.

Tujuan dari studi ini adalah mampu mendesain dan membuat secara mandiri pelat baja tahan peluru yang setipis mungkin tetapi masih memiliki kemampuan menahan penetrasi peluru kaliber 5,56 mm yang ditembakkan setidaknya dengan kecepatan 900 m/s pada jarak 25 m.

2. Metode Penelitian

2.1 Pembuatan Paduan

Proses pengecoran digunakan untuk membuat pelat baja dengan komposisi kimia sesuai dengan yang diinginkan. Proses pengecoran dilakukan di salah satu industri kecil dan menengah di daerah Ceper, Klaten. Tungku yang digunakan pada penelitian ini adalah tungku busur listrik (*electric arc furnace*). Komposisi kimia baja yang dibuat mengacu pada dua jenis baja, yaitu *high strength low alloy steel* (HSLA) dan *wootz steel*. Baja HSLA dipilih karena sebagian besar baja yang digunakan sebagai *armour steel* adalah dari jenis baja ini. Kemudian berdasarkan hasil penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan berbagai baja komersial, diperoleh hasil baja jenis HSLA adalah satu-satunya jenis baja yang mampu menahan penetrasi peluru. Sementara itu, *wootz steel* adalah jenis baja karbon tinggi. Dahulu, *wootz steel* adalah bahan baku untuk pembuatan pedang yang terkenal dengan nama *Damascus Steel*, yaitu sejenis pedang yang digunakan oleh Nabi Muhammad dan kaum muslimin. Pedang tersebut terkenal keras dan kuat yang selalu mampu mematahkan pedang lawan. Pada penelitian ini pelat baja yang dibuat mengacu pada *wootz steel* dengan variasi penambahan Cr, Ni dan V sebagai unsur-unsur pembentuk karbida yang diharapkan mampu membuat baja menjadi sangat keras dan kuat. Ukuran pelat yang dihasilkan dari proses pengecoran adalah 150 x 150 x 22 mm.

2.2 Proses Tempa

Proses tempa digunakan untuk memperbaiki pelat hasil pengecoran, terutama untuk menutup cacat porositas yang terjadi dari hasil proses pengecoran. Proses tempa yang digunakan adalah proses *open die forging*. Untuk keperluan ini maka didesain dan dibuat mesin tempa dengan kapasitas 70 ton. Pelat yang diperoleh dari hasil tempa akan mengalami pengurangan ketebalan menjadi 10-14 mm.

2.3 Proses Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas dilakukan untuk mendapatkan struktur mikro dan sifat mekanik akhir yang diinginkan. Proses perlakuan panas dilakukan pada tungku perlakuan panas yang mampu memanaskan benda kerja hingga 1200°C. Ada dua tahap proses perlakuan panas yang dilakukan yaitu:

- Pemanasan hingga temperatur austenisasi (>910°C) dilanjutkan dengan *oil quenching* untuk mendapatkan struktur mikro martensit.
- Proses perlakuan panas tempering, yaitu memanaskan kembali benda kerja pada tungku pada temperatur 250°C untuk memperoleh struktur mikro *fine martensitic lath structure* yang memiliki kekuatan dan ketangguhan yang tinggi.

2.4 Proses Permesinan

Proses permesinan digunakan untuk mendapatkan dimensi akhir benda kerja serta untuk menghaluskan permukaan benda kerja. Proses yang digunakan adalah proses *milling* atau freis pada mesin milling. Dimensi akhir benda kerja yang diperoleh dari proses ini adalah 180 x 180 x 8 mm.

2.5 Uji Tembak

Pengujian tembak dilakukan di lapangan tembak markas Brimob Semarang. Pengujian dilakukan oleh seorang anggota Brimob yang memiliki keahlian sebagai penembak jarak jauh (sniper). Senapan yang digunakan adalah AK 101 kaliber 5,56 dengan kecepatan tembak 900 m/s. Jarak tembak yang digunakan sesuai standar pengujian yang biasa dilakukan oleh PT. Pindad yaitu sebesar 25 m. Sementara peluru yang digunakan adalah MU4-TJ dengan kaliber 5,56 mm. Sebelum dilakukan uji tembak pada pelat, kecepatan peluru diukur terlebih dahulu dengan menggunakan alat *chronograph digital* (lihat Gambar 1).



Gambar 1. Chronograph Digital

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Proses Pengecoran

Proses pengecoran dilakukan di salah satu industri kecil dan menengah (IKM) di daerah Ceper, Klaten. Hasilnya diperoleh benda cor berupa pelat yang sesuai dengan yang diinginkan (lihat Gambar 2).



Gambar 2. Pelat Baja Hasil Proses Pengecoran yang Baik

(a)					(b)						
No	Chemical composition	%	No	Chemical composition	%	No	Chemical composition	%	No	Chemical composition	%
1	C	0,465	10	Ni	0,081	1	C	1,573	10	Ni	0,067
2	Si	0,538	11	Cu	0,187	2	Si	0,164	11	Cu	0,369
3	Mn	0,644	12	Al	≤0,0050	3	Mn	0,081	12	Al	≤0,0083
4	P	0,048	13	Co	0,0080	4	P	0,066	13	Co	0,0056
5	S	0,034	14	Mg	≤0,0050	5	S	0,063	14	Mg	≤0,0050
6	Cr	1,140	14	Nb	0,077	6	Cr	0,259	14	Nb	0,013
7	Mo	0,041	16	Ti	≤0,0032	7	Mo	0,015	16	Ti	≤0,011
8	Fe	96,91	17	V	0,010	8	Fe	97,19	17	V	0,016
9			18	W	0,100	9			18	W	0,100

(c)					(d)						
No	Chemical composition	%	No	Chemical composition	%	No	Chemical composition	%	No	Chemical composition	%
1	C	1,565	10	Ni	3,50	1	C	1,465	10	Ni	0,081
2	Si	0,538	11	Cu	0,087	2	Si	0,538	11	Cu	0,187
3	Mn	0,644	12	Al	≤0,0050	3	Mn	0,684	12	Al	≤0,0050
4	P	0,048	13	Co	0,0080	4	P	0,048	13	Co	0,0080
5	S	0,034	14	Mg	≤0,0050	5	S	0,034	14	Mg	≤0,0050
6	Cr	1,140	14	Nb	0,077	6	Cr	1,50	14	Nb	0,077
7	Mo	0,041	16	Ti	≤0,0032	7	Mo	0,041	16	Ti	≤0,0032
8	Fe	94,41	17	V	0,10	8	Fe	94,51	17	V	0,010
9			18	W	0,100	9			18	W	0,100

(e)					
No	Chemical composition	%	No	Chemical composition	%
1	C	1,465	10	Ni	3,041
2	Si	0,538	11	Cu	0,187
3	Mn	0,644	12	Al	≤0,0050
4	P	0,088	13	Co	0,0080
5	S	0,034	14	Mg	≤0,0050
6	Cr	1,140	14	Nb	0,077
7	Mo	0,041	16	Ti	≤0,0032
8	Fe	92,91	17	V	0,010
9			18	W	0,100

Gambar 3. Hasil Pengujian Komposisi Kimia: (a) Baja A, (b) Baja B, (c) Baja C, (d) Baja D, (e) Baja E

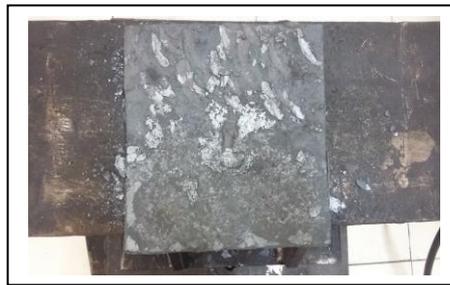
Tabel 1. Hasil Uji Kekerasan Pelat Hasil Proses Cor

Nilai Kekerasan Baja (HB)					
Uji ke-	A	B	C	D	E
1	271	190	512	279	271
2	279	199	496	279	271
3	279	203	496	294	231
Rata-rata	276,3	197,3	501,3	284,0	257,6

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk setiap pelat yang dibuat, hasilnya dapat dilihat pada Gambar 3. Baja A adalah jenis baja HSLA, sementara baja B-E adalah jenis baja karbon tinggi yang mendekati komposisi *wootz steel*. Pengujian kekerasan juga dilakukan pada baja *as-cast* untuk mengetahui nilai kekerasan awal pelat baja sebelum dilakukan proses perlakuan panas. Hasil uji kekerasan dapat dilihat pada tabel 1. Dari tabel 1 terlihat, baja C memiliki kekerasan rata-rata sekitar 500 HB. Nilai kekerasan sebesar ini berdasarkan studi literatur merupakan nilai kekerasan yang cukup untuk menahan penetrasi dari peluru. Baja C mengandung Cr, Ni dan V yang cukup besar. Sementara untuk baja lain nilai kekerasannya masih jauh dari 500 HB sehingga perlu proses tempa dan perlakuan panas untuk meningkatkannya.

3.2 Hasil Proses Tempa

Proses tempa yang dilakukan bertujuan untuk mengurangi cacat-cacat porositas yang terjadi pada pelat baja hasil proses pengecoran. Hasil dari proses tempa yang dilakukan memenuhi syarat untuk diteruskan ke proses selanjutnya, yaitu proses perlakuan panas, proses permesinan dan uji tembak (lihat Gambar 4)



Gambar 4. Pelat Hasil Proses Tempa

3.3 Hasil Proses Heat Treatment

Proses *heat treatment* dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik pelat hasil cor dan tempa. Parameter proses *heat treatment* untuk setiap pelat seperti terlihat pada Tabel 2. Foto struktur mikro hasil proses *heat treatment* dapat dilihat pada Gambar 5. Dari Gambar 5 terlihat bahwa struktur mikro yang dihasilkan berbeda-beda. Struktur mikro pelat A dan C yang dihasilkan adalah bainit dan martensit (putih), dimana martensit pada pelat A terlihat lebih banyak dan lebih halus dibanding pelat C. Hal ini yang menyebabkan nilai kekerasan pelat A lebih besar dibanding pelat C. Sementara itu, struktur mikro pelat B dan D memiliki kemiripan, dimana struktur mikro kedua pelat tersebut adalah ferit (warna putih) dan pearlit (warna hitam). Struktur mikro pelat E adalah *spheroidize annealed*.

Nilai kekerasan masing-masing pelat dapat dilihat pada Tabel 3. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh oleh pelat A dan C, dengan nilai rata-rata kekerasan masing-masing adalah 506 dan 464 HB. Nilai kekerasan yang biasa digunakan untuk pelat baja tahan peluru adalah 500 HB. Dari hasil ini, pelat yang mungkin dapat menahan peluru adalah pelat A.

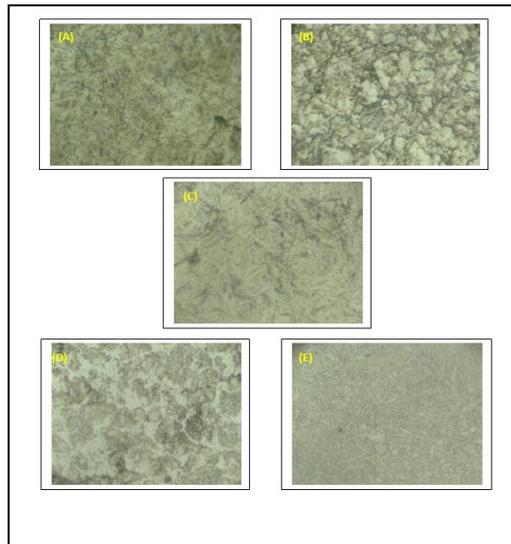
Tabel 2. Parameter Proses *Heat Treatment*

No.	Pelat	Temp. Austenisasi (°C)	Holding Time (menit)	Media Celup	Temperatur Tempering (°C)	Holding Time (menit)
1	A	855	10	Oli	175	120
2	B	800	60	Oli	205	120
3	C	800	60	Udara	205	120
4	D	800	60	Udara	205	120
5	E	800	60	Udara	205	120

Pelat A adalah jenis baja *high strength low alloy steel* (HSLA), yaitu jenis baja yang banyak digunakan pada material armor. Pelat B, C, D dan E terbuat dari baja karbon tinggi dengan perbedaan yang signifikan pada kadar Ni, Cr dan V. Semua unsur tersebut adalah pembentuk karbida logam yang akan menambah nilai kekerasan dari baja. Kadar Ni tertinggi terdapat pada pelat C dan E, dimana kadar Ni pada pelat-pelat tersebut adalah 3,50% dan 3,04%. Sementara pada pelat B dan D kadar Ni kurang dari 0,1%. Kadar Cr tertinggi ada pada pelat C, D dan E yaitu berturut-turut 1,14%, 1,50% dan 1,14%. Dan kadar V pada semua pelat berada di bawah 0,05% kecuali pada pelat C sebesar 0,1%. Dari uji komposisi kimia terlihat bahwa pelat C memang memiliki kadar Ni, Cr dan V yang paling banyak bila dibanding dengan pelat baja karbon tinggi lainnya, sehingga adalah wajar jika nilai kekerasan dari pelat ini lebih besar bila dibanding dengan pelat-pelat lainnya.

3.4 Hasil Uji Tembak

Tabel 4 memperlihatkan hasil uji tembak yang telah dilakukan. Dari kelima pelat dengan komposisi kimia berbeda-beda, pelat yang mampu menahan tembusan peluru kaliber 5,56 mm dengan kecepatan ± 900 m/s pada jarak 25 m adalah pelat A dan C. Pelat A adalah modifikasi dari baja *high strength low alloy steel* dan pelat C adalah modifikasi dari baja karbon tinggi *wootz steel*. Walau nilai kekerasan baja pelat C sedikit di bawah 500 HB, namun pelat C ternyata mampu menahan tembusan peluru yang ditembakkan. Sementara itu pelat baja B, D dan E yang memiliki nilai kekerasan 300 – 324 HB tidak dapat menahan peluru.



Gambar 5. Struktur Mikro 5 Pelat Setelah Proses Heat Treatment.

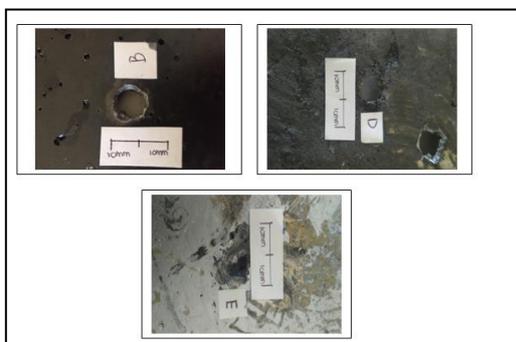
Tabel 3. Kekerasan pelat baja setelah proses *heat treatment*

	Spesimen				
	A	B	C	D	E
1	512 HB	319 HB	455 HB	294 HB	319 HB
2	496 HB	319 HB	468 HB	294 HB	327 HB
3	512 HB	327 HB	468 HB	311 HB	327 HB
Rata-rata	506 HB	322 HB	464 HB	300 HB	324 HB

Tabel 4. Hasil uji tembak

Pelat	Hasil Uji Tembak
A	Tidak Tembus
B	Tembus
C	Tidak Tembus
D	Tembus
E	Tembus

Gambar 6 memperlihatkan hasil uji tembak pada pelat baja yang dapat ditembus oleh peluru. Foto bagian depan pelat yang ditembus oleh peluru memperlihatkan bentuk kerusakan yang hampir sama, yaitu adanya pecahan-pecahan kecil yang terlempar dari pelat akibat tumbukan yang sangat keras dan cepat dengan peluru atau disebut dengan *spalling*. Gambar 7 memperlihatkan bagian depan pelat A dan C setelah diuji tembak. Ketika pelat baja meningkat kekerasannya, kedua pelat yang ditembak hanya membentuk tanda bekas indentasi. Di bagian tengah indentasi tersebut terlihat adanya bekas peluru yang menempel. Hasil yang diperoleh akan terus dievaluasi dan diupayakan perbaikan-perbaikan agar baja yang mampu menahan peluru dapat dibuat lebih tipis lagi



Gambar 6. Hasil Uji Tembak Pelat baja B, D dan E pada Bagian Muka



Gambar 7. Hasil Uji Tembak Pelat baja A dan C pada Bagian Muka

4. Kesimpulan

Ada 5 jenis pelat baja dengan 5 komposisi berbeda yang berhasil dibuat dengan menggunakan tungku busur listrik. Satu jenis baja telah memiliki kekerasan sekitar 500 HB dimana baja dengan kekerasan tersebut mampu menahan penetrasi peluru. Proses tempa digunakan untuk meminimalkan cacat porositas dan meningkatkan kekuatan pelat baja. Dari hasil uji kekerasan setelah pelat mengalami proses tempa dan *heat treatment*, nilai kekerasan pelat baja yang tertinggi adalah pelat A yang merupakan modifikasi dari baja *high strength low alloy steel* dengan kekerasan di atas 500 HB, sementara pelat baja yang merupakan modifikasi dari baja karbon tinggi *wootz steel* yang memiliki kekerasan yang tertinggi adalah pelat C yang memiliki kadar unsur-unsur pembentuk karbida Ni, Cr dan V yang terbanyak dimana kekerasannya sedikit dibawah 500 HB. Dari hasil uji tembak didapatkan bahwa kedua baja yang memiliki kekerasan tertinggi, yaitu pelat A dan C berhasil menahan penetrasi peluru kaliber 5,56 mm yang ditembakkan dengan kecepatan 900 m/s pada jarak 25 meter.

Daftar Pustaka

- [1] Borvik, T., Leinum, J.R., Solberg, J.K., Hopperstad, O.S., Langseth, M., 2001, "Observations on shear plug formation in Weldox 460 E steel plates impacted by blunt-nose projectiles", *International Journal of Impact Engineering* 25: 553-572.
- [2] Palleti., H.N.K.T., Gurusamy, S., Kumar, S., Soni., R., John, B., Vaidya, R., Bhoge, A., Naik, M.K., 2012, "Ballistic impact performance of metallic targets", *Materials and Design* 39: 253-263.
- [3] Durmus, A., Gudeb, M., Gulcimen, B., Ulku, S., Musa, E., 2011, "Experimental investigations on the ballistic impact performance of cold rolled sheet metals", *Materials and Design* 32: 1356-1366.
- [4] Kilic, N., Ekici, B., (2003), "Ballistic resistance of high hardness armor steels againsts 7.62 mm armor piercing ammunition", *Materials and Design* 44: 35-48.
- [5] Demir, T., Ubeyli, M., Yildirim, R.O., 2008, "Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys againsts 7.62 mm armor piercing projectile", *Materials and Design* 29: 2009-2016.
- [6] Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O.S., Malo, K.A., 2002, "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: 19-35.
- [7] Chen, J.K., Medina, D.F., 1998, "The effect of projectile shape on laminated composite perforation", *Composite Science & Technology* 58: 1629-1639.
- [8] Dey, S., Borvik, T., Hopperstad, O.S., Leinum, J.R., Langseth, M., 2004, "The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes", *International Journal of Impact Engineering* 30: 1005-1038.
- [9] Gupta, N.K., Iqbal, M.A., Sekhon, G.S., 2007, "Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behaviour of aluminium plates", *International Journal of Solids and Structures* 44: 3411-3439.
- [10] Iqbal, M.A., Gupta, C., Diwakar, A., Gupta, N.K., 2010, "Effect of projectile nose shape on the ballistic resistance of ductile targets", *European Journal of Mechanics A/Solids* 29: 683-694.
- [11] Rusinek, A., Rodriguez-Martinez, J.A., Arias, A., Klepaczko, J.R., Lopez-Puente, J., 2008, "Influence of conical projectile diameter on perpendicular impact of thin steel plate", *Engineering Fracture Mechanics* 75: 2946-2867.
- [12] Ulven, C., Vaidya, U.K., Hosur, M.V., 2003, Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels, *Composite Structure* 61, pp 143-150.
- [13] Rusnaldy, Haryanto, I., Nugraha, A.N., Zaedun, A., Widodo, A., Kiono, B.T.K., 2013, "Studi Awal Ketahanan Balistik pada Lembaran Baja", *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII Lampung*: 828-833.
- [14] Rusnaldy, Haryanto, I., Iskandar, N., Anugra, B. A., Zaedun, A., 2014, "Pengaruh Jumlah Lapisan Material Target Terhadap Ketahanan Balistik Lembaran Baja", *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII Depok*: 864-869.
- [15] Rusnaldy, Haryanto, I., Nugroho, S., Tadjuddin, N.F., Purwanto, D.A., Azmi, A.L., 2014, "Perbandingan Karakteristik Balistik pada Baja Karbon Rendah yang Ditembaki Peluru yang Terdeformasi dan Tidak Terdeformasi", *Proceeding Seminar Nasional Teknoin UII*: 134-138.