



Pengaruh Variasi Temperatur Proses *Austempering* Terhadap Mikrostruktur dan Sifat Mekanik Baja *Armour*

Slamet Sutjipto^{1*}, Ilham Azmy², Destri Muliastri³, Devi Eka Septiyani Arifin⁴

^{1,2,3,4} Politeknik Negeri Bandung, Bandung

Email: slamet.sutjipto@polban.ac.id

Received : 6 Juni 2023; Received in revised form : 15 Juni 2023; Accepted : 21 Juni 2023

Abstract

Armour steel is a medium-carbon steel which is widely used in military and defense industries owing to its ability to protect from projectile and bullet pressure. However, this armour steel still posses mechanical limitation aspect, thus it is needed to engineer for improvement. Therefore, the aim of this research is to undergo mechanical properties engineering by using heat treatment method of austempering within temperature variations of 200, 250, 350, 450, and 500 °C. Experimental results show that austempering process affected to fraction quantity of phase and microstructure of ferrite, pearlite, and bainite. Armour steel resulted by austempering process in temperature 500 °C depicts microstructure transformation and mechanical properties improvement significantly. Microstructure transformation along with proportional fraction volume phases of upper bainite, ferrite, and pearlite highly beneficial to increase impact strength dan ductility of armour steel. Thereby, armour steel resulted by austempering process in temperature 500 °C has thoroughly increased its mechanical properties which capable to be applied in military and defense industries.

Keywords: *armour steel, austempering, microstructure, mechanical properties*

Abstrak

Baja *armour* merupakan baja karbon menengah (*medium carbon steel*) yang banyak diaplikasikan dalam industri militer dan pertahanan karena kemampuannya untuk menahan tekanan proyektil dan peluru. Namun demikian, baja *armour* ini masih memiliki keterbatasan aspek sifat mekanik sehingga masih perlu untuk direkayasa agar dapat ditingkatkan. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan proses rekayasa sifat mekanik dengan menggunakan metode perlakuan panas *austempering* dengan variasi temperatur 200, 250, 350, 450, dan 500 °C. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa proses *austempering* memberikan pengaruh terhadap kuantitas fraksi fasa dan mikrostruktur ferrit, *pearlite*, hingga *bainite*. Baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 500 °C memperlihatkan transformasi mikrostruktur dan peningkatan sifat mekanik yang signifikan. Transformasi mikrostruktur dengan fraksi volume fasa bainit atas (upper bainite), ferrit, dan *pearlite* yang proporsional sangat berpengaruh terhadap kenaikan nilai ketahanan impact dan keuletan baja *armour* tersebut. Dengan demikian, baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 500 °C ini telah mengalami peningkatan sifat mekanik yang mumpuni sehingga dapat diaplikasikan secara luas pada industri militer dan pertahanan.

Kata kunci: *baja armour, austempering, mikrostruktur, sifat mekanik*

1. PENDAHULUAN

Material *armour* merupakan material yang memiliki kekuatan dan ketahanan terhadap energi impact yang tinggi sehingga dapat berfungsi sebagai pelindung dari proyektil selama proses pertempuran. Dengan kata lain, material *armour* ini banyak digunakan pada industri militer dan pertahanan. Pemilihan material dan proses yang tepat menjadi sangat krusial dalam menghasilkan material *armour* yang mumpuni. Beberapa material seperti baja dengan kekuatan yang tinggi, paduan aluminium (Al), hingga paduan titanium (Ti) telah digunakan sebagai material *armour*. Dari beberapa jenis material tersebut, baja

secara dominan digunakan pada aplikasi *armour* berdasarkan harganya yang relatif murah, kemampuan sifat mekanik yang dapat ditingkatkan, dan sifat mampu mesin (*machineability*) yang baik.

Salah satu yang menjadi perhatian adalah bahwa performa dari baja sebagai material *armour* sangat bergantung pada sifat mekaniknya yaitu kekuatan, kekerasan, ketangguhan, mikrostruktur, dan ketahanan impact. Optimasi baja *armour* untuk peningkatan perlindungan dari proyektil impact ini telah banyak diaplikasikan pada aplikasi pertahanan dan militer. Beberapa penelitian terkait optimasi sifat mekanik baja *armour* telah dilakukan pada studi-studi sebelumnya. P.K. Jena dkk. (2016) telah melakukan studi terkait dengan pengaruh waktu proses *tempering* terhadap performa balistik dari baja *armour* [1]. Semakin rendah waktu proses *tempering* mengakibatkan peningkatan performa balistik pada baja *armour* tersebut. Yurianto dkk. (2018) melakukan studi tentang parameter *quenching* dan *tempering* terhadap pelat baja *armour* hasil proses *hot rolled* [2]. Hasil penelitiannya menunjukkan dengan kenaikan waktu tahan proses *quenching* dan *tempering* mengakibatkan peningkatan nilai impact dan kekerasan yang baik.

Dari beberapa hasil studi tersebut, maka dapat diperhatikan bahwa perlakuan panas merupakan proses yang biasa dilakukan untuk merekayasa baja sesuai sifat mekanik yang diharapkan. Hasil dari perlakuan panas pada baja ini menghasilkan bentuk fasa martensit yang keras, namun demikian menyisakan tegangan dalam (*internal stress*) yang besar sehingga baja menjadi mudah *crack* (patah) [3]. Di sisi lain, proses *austempering* menawarkan keunggulan yang berbeda yaitu peningkatan keuletan dan ketangguhan yang signifikan pada baja sehingga berkorelasi dengan kenaikan adsorpsi energi impact [4]. Beberapa proses *austempering* telah dikaji dalam aplikasi rekayasa baja karbon seperti yang telah dilakukan Cheng-Yi Chen (2016) mengenai efek proses *austempering stainless steel* SUS440 terhadap mikrostruktur dan sifat mekaniknya [5]. Hasil studinya menunjukkan bahwa proses *austempering* mempengaruhi fraksi volume fasa dan distribusi karbida pada *stainless steel* SUS440 sehingga menghasilkan kekuatan (*strength*) dan kekerasan yang lebih tinggi.

Maka dari itu, pada penelitian ini dilakukan rekayasa baja *armour* dengan menggunakan salah satu teknik perlakuan panas yaitu metode *austempering* untuk meningkatkan transformasi mikrostruktur dan sifat mekanik baja *armour*. Pemilihan variasi temperatur *austempering* diberikan pada 200 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C, dan 500 °C sehingga dapat dianalisis perubahannya terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik. Variasi temperatur tersebut dipilih berdasarkan pada tingkatan (*level*) proses *tempering* yang umumnya dilakukan pada baja karbon *medium* yang sesuai dengan kandungan karbon pada baja *armour* [6]. Penelitian ini sangat diharapkan menjadi sebuah terobosan dalam pengembangan baja *armour* dengan metode *austempering* sehingga memiliki sifat kekerasan dan ketahanan impact yang mumpuni.

2. METODE PENELITIAN

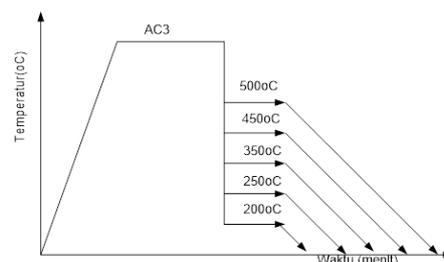
Metode penelitian ini menggunakan proses eksperimentasi yang melibatkan proses preparasi spesimen, proses perlakuan panas *austempering*, serta proses pengujian spesimen baja *armour* dengan beberapa tahapan penelitian yang dijelaskan berikut ini :

2.1. Preparasi Spesimen

Material baja *armour* yang digunakan pada penelitian ini merupakan baja *armour* komersil (PT. Bhinneka Bajasas). Proses pembuatan spesimen penelitian dipersiapkan dengan memotong baja *armour* dalam dimensi 15x10x5 mm yang selanjutnya digunakan sebagai spesimen untuk tahapan proses kedepannya.

2.2. Proses Austempering

Proses *austempering* didesain terlebih dahulu seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Proses *Austempering* Baja *Armour*

Proses austempering dilakukan dengan memanaskan spesimen baja *armour* pada temperatur austenisasi 900 °C di dalam tungku *furnace* selama 1 jam, lalu didinginkan secara cepat menggunakan media pendingin air. Selanjutnya, spesimen baja *ditemper* dengan variasi temperatur yang berbeda pada 200 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C, dan 500 °C selama 20 menit dan didinginkan juga dengan media pendingin air. Spesimen yang telah diberi perlakuan *austempering* tersebut kemudian dilakukan pengujian komposisi kimia (spektrometri), mikrostruktur, kekerasan, dan ketahanan impaknya.

2.3. Uji Spektrometri

Uji spektrometri dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur kimia pada baja *armour* yang digunakan dalam penelitian ini. Uji Spektrometri menggunakan alat spektrometer emisi optik tipe ARL 3460 (*Thermo Scientific*). Setelah uji spektrometri dilakukan, maka akan didapatkan data kandungan unsur kimia spesimen baja *armour* yang digunakan pada penelitian ini.

2.4. Proses Metalografi

Proses metalografi dilakukan untuk mengamati mikrostruktur hasil dari rekayasa *austempering*. Proses metalografi diawali dengan melakukan *mounting* pada spesimen baja *armour* dengan bakelit, lalu dilanjutkan dengan menghaluskan permukaannya dengan *abrasive paper* dari *grade* paling kasar (400 *mesh*) hingga *grade* paling halus (2000 *mesh*). Spesimen baja *armour* lalu dipoles dengan menggunakan pasta alumina, dan selanjutnya dilakukan proses *etching* dengan larutan nital (alkohol dan asam nitrat 3%). Setelah itu, pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop optik tipe Olympus BM untuk mengobservasi bentuk fasa-fasa yang terbentuk pada baja *armour* hasil proses *austempering*.

2.5. Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan untuk menilai angka kekerasan yang dihasilkan dari rekayasa *austempering* pada spesimen baja *armour*. Uji kekerasan yang digunakan dalam penelitian ini melalui metode *Vickers hardness testing*, sehingga satuan nilai kekerasan yang dipakai adalah *Hardness Vickers* (HV). Uji kekerasan ini menggunakan alat *microhardness tester* Mitutoyo HM-122 dengan standar ASTM E384.

2.6. Uji Impak

Uji dampak dilakukan untuk mengetahui ketahanan baja *armour* hasil rekayasa *austempering* terhadap beban kejut. Selain itu, uji dampak ini juga dapat digunakan untuk melihat bentuk patahan yang terjadi pada material baja *armour*. Metode uji dampak yang digunakan adalah metode *charpy* dengan standar ASTM E23 dengan alat uji GT-7045-HM *Pendulum Impact Tester*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Uji Spektrometri

Proses evaluasi kandungan komposisi kimia material yang digunakan pada penelitian ini menggunakan alat uji spektrometri. Dari hasil uji spektrometri didapatkan data komposisi kimia material seperti terlihat pada Gambar 2.

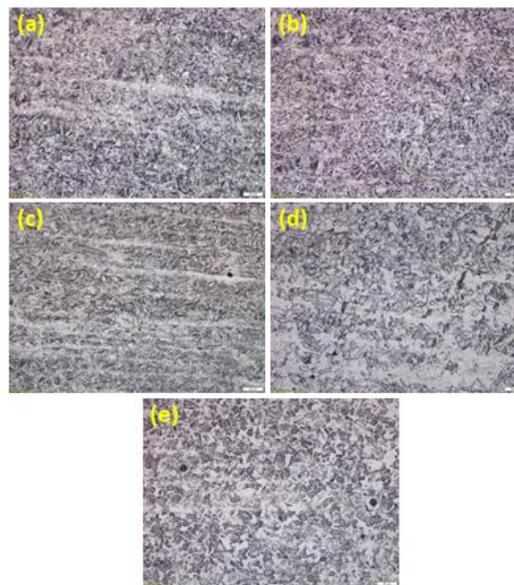
SPEKTROMETER EMISI OPTIK		
No	Unsur / Element	Wt. %
1	Carbon (C)	0,349
2	Silicon (Si)	0,178
3	Sulfur (S)	0,002
4	Phosphorus (P)	0,007
5	Manganese (Mn)	0,308
6	Nickel (Ni)	1,55
7	Chromium (Cr)	0,28
8	Molybdenum (Mo)	0,588
9	Vanadium (V)	0,029
10	Copper (Cu)	0,018
11	Wolfram/Tungsten (W)	0,007
12	Titanium (Ti)	0,008
13	Tin (Sn)	0,001
14	Aluminium (Al)	0,048
15	Plumbum/Lead (Pb)	0,0009
16	Antimony (Sb)	0,000
17	Niobium (Nb)	0,000
18	Zirconium (Zr)	0,000
19	Zinc (Zn)	0,003
20	FerroIron (Fe)	96,623

Gambar 2. Data Hasil Uji Spektrometri

Data hasil uji spektrometri tersebut menunjukkan dominasi unsur *ferrous* (96,623 %) yang signifikan. Selain itu, terlihat komposisi jumlah unsur karbon (0,349 %) beserta paduan unsur lainnya seperti kromium (0,28 %), nikel (1,55 %), dan molybdenum (0,588 %). Dengan demikian, material yang digunakan dalam penelitian ini dapat dikategorikan sebagai baja *armour* (*armour steel*) [7].

3.2. Analisis Pengamatan Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur telah dilakukan untuk menganalisis fasa-fasa yang terbentuk pada spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* dengan variasi temperatur 200 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C, dan 500 °C. Pada Gambar 3 dapat dilihat mikrostruktur baja *armour* hasil proses *austempering* yang telah dilakukan. Dari Gambar 3(a) hingga Gambar 3(e) tersebut, dapat diamati bahwa proses *austempering* dengan temperatur bervariasi telah mempengaruhi pembentukan dan transformasi mikrostruktur yang berbeda-beda.



Gambar 3. Mikrostruktur Baja *Armour* Hasil Perlakuan Panas *Austempering*; (a) 200 °C, (b) 250 °C, (c) 350 °C, (d) 450 °C, (e) 500 °C.

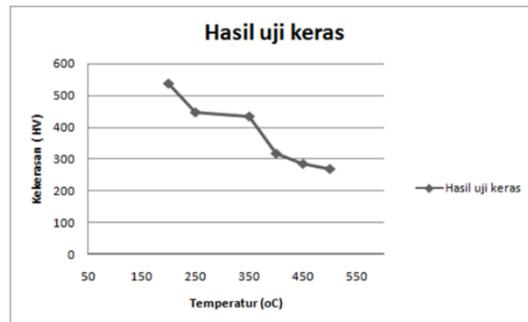
Pada Gambar 3(a-c), spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 200 °C, 250 °C, 350 °C menghasilkan mikrostruktur bainit bawah (*lower bainite*) yang relatif sedikit sedangkan dominasi fasa yang berlimpah terdiri dari martensit dan ferrit. Jumlah fasa bainit bawah (*lower bainite*) yang relatif sedikit tersebut disebabkan oleh masih rendahnya temperatur *austempering* yang digunakan sehingga menyebabkan lambatnya *lower martensite start* (M_s) sebagaimana pada kurva pendinginan *non-equilibrium* [8].

Gambar 3(d-e) menunjukkan mikrostruktur spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 450 °C dan 500 °C dengan susunan fasa dominasi bainit atas (*upper bainite*) dalam matriks ferrit dan *pearlite*. Pembentukan fasa bainit atas (*upper bainite*) banyak dipengaruhi oleh temperatur *moderate austempering* pada 450 °C dan 500 °C, dimana fasa austenit dapat bertransformasi sempurna menjadi fasa bainit atas (*upper bainite*) berbentuk *granular* [6, 8]. Di sisi lain, pembentukan matriks ferrit dan *pearlite* disebabkan oleh temperatur austenisasi 900 °C yang disertai pendinginan lambat terlebih dahulu sehingga bertransformasi menjadi α -ferrit dan sementit (Fe_3C) yang kemudian menjadi fasa *pearlite*. Fenomena adanya *pearlite* ini biasanya menyebabkan peningkatan kekuatan dan keuletan pada spesimen baja *armour* [9].

3.3. Analisis Uji Kekerasan

Uji kekerasan (*hardness test*) dilakukan untuk menganalisis nilai kekerasan setiap spesimen baja *armour* dari hasil proses perlakuan panas *austempering*. Sifat kekerasan (*hardness*) ini merupakan salah satu unsur sifat mekanik yang penting dalam menentukan ketahanan spesimen terhadap pembebanan

indentasi, goresan, maupun tekanan. Selain itu, uji kekerasan ini menjadi sangat penting sebagai tolak ukur untuk menganalisis hubungan proses perlakuan panas *austempering* pada spesimen baja *armour* terhadap sifat kekerasannya. Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa variasi temperatur proses perlakuan panas *austempering* berdampak besar pada perubahan nilai kekerasan dari spesimen baja *armour*. Dalam proses uji keras digunakan metode *Vickers* menggunakan indenter intan sehingga satuan nilai kekerasannya dinotasikan dalam *Hardness Vickers* (HV).



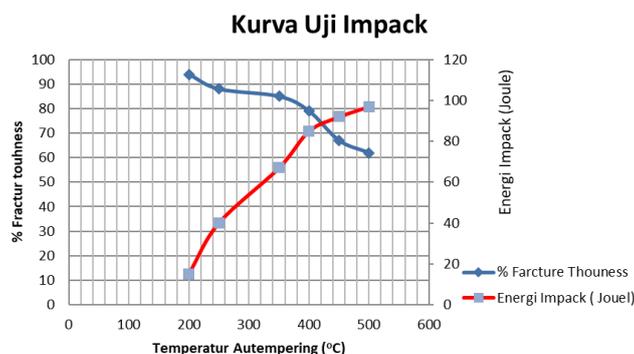
Gambar 4. Nilai Kekerasan Spesimen Baja *Armour* Pada Variasi Temperatur Proses *Austempering*.

Dari variasi temperatur proses *austempering* pada baja *armour*, nilai kekerasan tertinggi ditunjukkan oleh spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 200 °C sebesar 538 HV. Seiring bertambah tingginya temperatur proses *austempering*, nilai kekerasan yang terobservasi semakin kecil seperti dapat dilihat pada nilai kekerasan spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 500 °C sebesar 269 HV. Fenomena ini menunjukkan dalam proses perlakuan panas *austempering* bahwa semakin tinggi temperaturnya maka akan semakin kecil nilai kekerasannya. Hal tersebut sejalan dengan pembentukan mikrostruktur pada temperatur *austempering* yang relatif rendah maka fasa yang terbentuk didominasi martensit yang keras pada matriks ferrit. Di sisi lain, pada temperatur *austempering* yang tinggi memiliki kecenderungan untuk membentuk fasa *pearlite* yang dapat memiliki nilai kekerasan relatif rendah [10].

Di sisi lain, tingginya nilai kekerasan pada spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 200 °C juga turut dipengaruhi adanya pembentukan dominasi fasa martensit yang masih relatif besar dalam mikrostrukturnya. Fasa martensit tersebut memang memberikan sumbangsih yang signifikan dalam peningkatan nilai kekesaran dibandingkan dengan fasa bainit [11]. Dengan demikian, spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 200 °C memiliki ketahanan terhadap indentasi dan tekanan yang lebih baik dibandingkan dengan spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* dengan variasi temperatur lainnya.

3.4. Analisis Uji Impak

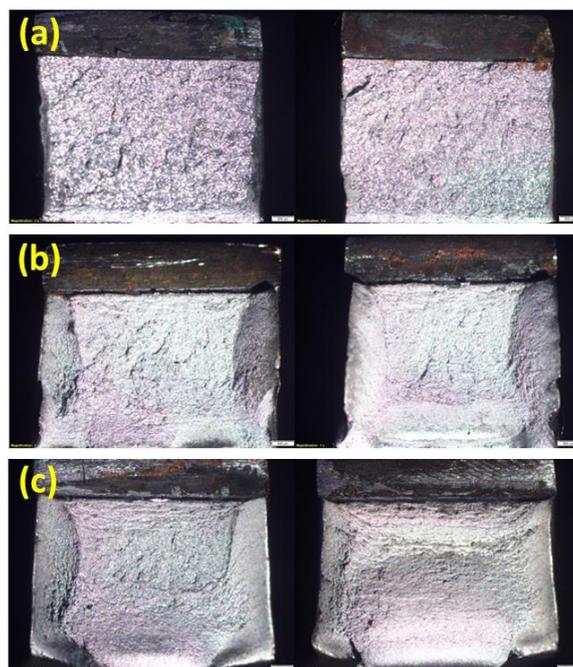
Untuk menilai pengaruh variasi temperatur proses *austempering* pada spesimen baja *armour* terhadap kekuatan impaknya, maka dilakukan uji impak (*impact test*) dengan metode *Charpy*. Hasil dari uji impak ini merupakan akumulasi energi adsorpsi yang dihasilkan dari alat uji impak dan dinotasikan dalam satuan Joule (J).



Gambar 5. Kurva Hasil Uji Impak Spesimen Baja *Armour* Hasil Proses *Austempering*.

Gambar 5 memperlihatkan hasil dari uji impact spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* dengan variasi temperatur yang berbeda. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa energi impact (*impact energy*) tertinggi sebesar 95 Joule dihasilkan oleh spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 500 °C. Sejalan dengan itu, tingginya nilai impact mempengaruhi menurunnya persentase ketangguhan patahan (*fracture toughness*) yang terbentuk dari proses hasil uji impact. Di sisi lain, seiring dengan menurunnya temperatur pada proses *austempering* spesimen baja *armour* maka nilai energi impact pun semakin menurun [12].

Setelah proses uji impact dilakukan, selanjutnya terbentuk patahan spesimen baja *armour* yang dapat dianalisis lebih lanjut. Gambar 6(a) menunjukkan patahan spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 250 °C yang berbentuk patahan yang berserabut dan cenderung getas (*brittle*). Patahan berserabut ini diakibatkan dari retakan (*crack*) yang terbentuk selama proses pembebanan dalam uji impact [13]. Patahan berserabut ini juga mengindikasikan bahwa spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 250 °C cenderung rapuh.



Gambar 6. Patahan spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* dengan variasi temperatur; (a), 250 °C, (b) 450 °C, (c) 500 °C.

Pada Gambar 6(b-c) memperlihatkan patahan spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 450 °C dan 500 °C yang berbentuk patahan ulet (*ductile*). Patahan ulet ini merupakan implikasi dengan adanya fasa ferrit dan *pearlite* sehingga menaikkan keuletan spesimen baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 450 °C dan 500 °C [14, 15]. Dengan demikian, baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 450 °C dan 500 °C memiliki ketahanan impact dan keuletan yang lebih baik sehingga akan sangat relevan bila digunakan sebagai material *armour* yang dapat menahan tekanan proyektil.

4. SIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah diperoleh, maka dapat disimpulkan bahwa baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 500 °C memperlihatkan transformasi mikrostruktur dan peningkatan sifat mekanik yang signifikan. Transformasi mikrostruktur dengan keberadaan fasa bainit atas (*upper bainite*), ferrit, dan *pearlite* yang proporsional sangat mempengaruhi terhadap peningkatan ketahanan impact dan keuletan yang mumpuni pada baja *armour* tersebut. Maka dari itu, baja *armour* hasil proses *austempering* pada temperatur 500 °C sangat relevan untuk dapat diaplikasikan sebagai material yang tahan terhadap peluru maupun proyektil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. P. K. Jena, P. Senthil P, and S. K. K, "Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 47-53, 2016.
- [2]. Yurianto, Pratikto, S. Rudy, and S. Wahyono, "Optimasi Parameter Quenching Dan Tempering Pada HRP Steel Lokal Sebagai Baja Armor Nasional," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 143-148, 2018.
- [3]. H. Zheng, K. M. Wu, O. Isayev, O. Hress, S. Yershov, and V. Tsepelev, "Effect of heat treatment parameters on the microstructure of quenching–partitioning–tempering steel," *Heat Treatment and Surface Engineering*, vol. 1, no. 1-2, pp. 83-86, 2019.
- [4]. X. Y. Long *et al.*, "Effect of austempering temperature on microstructure and cyclic deformation behaviour of multiphase low-carbon steel," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 23, no. 3, 2023.
- [5]. C.-Y. Chen, F.-Y. Hung, T.-S. Lui, and L.-H. Chen, "Microstructures and Mechanical Properties of Austempering SUS440 Steel Thin Plates," *Metals*, vol. 6, no. 2, 2016.
- [6]. B. Bandanadjaja, D. Idamayanti, N. Widarmansyah, and A. Lestarianto, "The effect of first step holding time of low high austempering heat treatment to the mechanical properties of Austempered Ductile Iron (ADI)," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 541, no. 1, 2019.
- [7]. S. M. Walley, "The Beginnings of the Use of Iron and Steel in Heavy Armour," in *Metallurgical Design and Industry*, 2018, pp. 71-153.
- [8]. O. Heidary, O. Mirzaee, A. Honarbakhsh Raouf, and E. Borhani, "Texture development during austempering process of an AISI 4130 steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 793, 2020.
- [9]. A. R. Subhani, D. K. Mondal, C. Mondal, H. Roy, and J. Maity, "Development of a High-Strength Low-Carbon Steel with Reasonable Ductility through Thermal Cycling," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 28, no. 4, pp. 2192-2201, 2019.
- [10]. Q. Luo, H. Mei, M. Kitchen, Y. Gao, and L. Bowen, "Effect of Short-Term Low-Temperature Austempering on the Microstructure and Abrasive Wear of Medium-Carbon Low-Alloy Steel," *Metals and Materials International*, vol. 27, no. 9, pp. 3115-3131, 2021.
- [11]. A. Ervan, Somawardi, and Sugianto, "Analisis Pengaruh Media Pendingin Dengan Kombinasi Waktu Penahanan Pendingin Terhadap Nilai Kekerasan Baja AISI-1045 Pada Proses Quenching " *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur*, vol. 13, no. 01, pp. 25-32, 2021.
- [12]. S. A. Jalil, Zulkifli, and T. Rahayu, "Analisa Kekuatan Impak Pada Penyambungan Pengelasan SMAW Material ASSAB 705 Dengan Variasi Arus Pengelasan," *Jurnal Polimesin*, vol. 15, no. 2, pp. 58-63, 2017.
- [13]. Y. Zhang, J. Yang, D. Xiao, D. Luo, C. Tuo, and H. Wu, "Effect of Quenching and Tempering on Mechanical Properties and Impact Fracture Behavior of Low-Carbon Low-Alloy Steel," *Metals*, vol. 12, no. 7, 2022.
- [14]. Asmadi, A. Reny, N. S. Zahara, and N. Ahmad, "Austempering Dengan Pendingin Oli Pada Baja Strip JIS G4801 SUP 9," *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, vol. 6, no. 1, pp. 47-57, 2019.
- [15]. M. Badaruddin, B. Bakti, B. Prasetyo, and Sugiyanto, "Effect of austempering temperatures on surface hardness of AISI 4140 steel," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1173, no. 1, 2021.