



## KARAKTERISTIK SIFAT MEKANIK DAN STRUKTURMIKRO BAJA LATERIT PADUAN NI-CR-MN HASIL TEMPA PANAS DENGAN VARIASI BEBAN TEMPA

**Satrio Herbirowo\*, Bintang Adjiantoro, Fatayalkadri Citrawati**

Pusat Penelitian Metalurgi dan Material - LIPI

Gedung 470 Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia 15310

\*E-mail: [satrio.herbirowo@gmail.com](mailto:satrio.herbirowo@gmail.com)

Masuk Tanggal : 21-08-2017, revisi tanggal : 30-05-2018, diterima untuk diterbitkan tanggal 21-06-2018

### Intisari

Baja laterit paduan NiCrMn berpotensi sebagai bahan baku alternatif baja yang memiliki ketangguhan yang tinggi dan dapat mensubstitusi baja AISI 4340 komersial. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik baja laterit sesuai standar AISI 4340 dilihat dari komposisi kimia, sifat mekanik dan strukturmikro setelah dilakukan proses tempa panas dengan variasi beban tempa. Proses tempa panas dilakukan pada temperatur 1200 °C menggunakan 3 variasi beban tempa yaitu 50, 75, dan 100 ton dan media pendingin oli. Hasil proses tempa panas kemudian dikarakterisasi komposisi kimia dengan OES (*optical emission spectrometry*), pengamatan metalografi dengan OM (*optical microscopy*), pengujian dampak metode Charpy dan uji keras dengan metode Rockwell C. Hasil analisis komposisi kimia menunjukkan bahwa baja laterit paduan NiCrMn memiliki komposisi kimia sesuai dengan AISI 4340 dengan modifikasi unsur Ni sebesar (%berat) 1,8; Cr 1,71; dan Mn 1,87. Hasil karakterisasi pada baja laterit paduan NiCrMn menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya persen reduksi yang diberikan, kekerasan dan ketangguhan makin meningkat. Pada persentase reduksi 31,02% diperoleh nilai kekerasan sebesar 61,21 HRC dengan struktur yang terbentuk adalah fasa martensit, dimana kemampuan menyerap energi adalah sebesar 0,166 J/mm<sup>2</sup>. Akan tetapi pada persen reduksi lebih besar yaitu 31,72%, nilai kekerasan dan kekuatan dampak menurun menjadi 58,56 HRC dan 0,19 J/mm<sup>2</sup>. Hal ini terjadi karena struktur yang terbentuk dalam baja laterit paduan NiCrMn adalah fasa martensit dengan austenit sisa.

**Kata Kunci:** Baja laterit paduan NiCrMn, AISI 4340, martensit, austenit sisa

### Abstract

*NiCrMn alloy lateritic steel has a potential as an alternative for steel raw material that has high toughness and substitute the commercial AISI 4340 steel. This research is conducted to know the characteristics of lateritic steels according to AISI 4340 standard from chemical composition, mechanical properties, and microstructure after hot forging process with variety of loads and oil as cooling media. The hot forging process was carried out at temperature of 1200 °C using 3 variety of forging loads: 50, 75, and 100 tons. The forged NiCrMn alloy lateritic steel was characterized by chemical composition analysis with OES (optical emission spectrometer), metallographic observation using OM (optical microscopy), Charpy impact test, and hardness Rockwell C. The result of chemical composition analysis showed that NiCrMn alloy lateritic steel had chemical composition in accordance to AISI 4340 with modification of Ni, Cr, and Mn elements equal to (wt.%) 1.8; 1.71; 1.87. The characteristics of NiCrMn alloy lateritic steel showed that the hardness and toughness increased when the % reduction improved. In reduction percentage of 31.02% it was obtained hardness value and energy absorb equal to 61.21 HRC and 0.166 J/mm<sup>2</sup>, with structure formed was martensite phase. However, at a higher reduction percentage of 31.72%, the hardness and impact strength values decreased to 58.56 HRC and 0.19 J/mm<sup>2</sup>. This occurred because of the structure formed in the NiCrMn alloy lateritic steel was a martensite phase with retained austenite.*

**Keywords:** NiCrMn alloy lateritic steels, AISI 4340, martensite, retained austenite

## 1. PENDAHULUAN

Bahan baku baja laterit diambil melalui bijih besi yang mengandung kadar nikel rendah. Bijih laterit ini biasa diabaikan penambang karena faktor ekonomis dan lebih mencari nikel yang berada di bawah lapisan limonit [1].

Karena baja laterit ini merupakan bahan alternatif pada produksi baja, maka baja laterit perlu dikembangkan dengan berbagai macam pembentukan logam, salah satunya dengan proses penempaan panas (*hot forging*) yang berfungsi untuk meningkatkan sifat mekanis [2]. Baja laterit paduan NiCrMn yang akan dibuat mengacu pada komposisi kimia standar AISI 4340 yang bisa diaplikasikan menjadi baja balistik [3]-[4] dengan sifat ketangguhan tinggi [5] dan pembentukan fasa martensitik setelah perlakuan panas *temper* serta morfologi *dimple* membuat baja tahan terhadap tembakan proyektil berukuran 7,62 dan 12,7 mm [6]. Baja laterit yang dikembangkan adalah baja hasil *converting* dari bahan baku NPI (*nickel pig iron*) dengan kandungan nikel 1-2% dan kadar karbon di atas 2% dengan peniupan gas oksigen mampu menurunkan kadar karbon dalam besi baja dengan kandungan nikel berkadar rendah yaitu antara 1-3% [7].

Pada penelitian sebelumnya oleh B. M. Gurumurthy, dkk. [8], telah dilakukan variasi perlakuan panas antara *quench* dan *austempering* pada baja AISI 4340 yang dihasilkan sifat mekanik berbanding terbalik antara kekerasan dan ketangguhan, serta penelitian tempa panas dengan variasi temperatur austenisasi dan didapat suhu optimal 1200 °C sebagai acuan dalam penelitian ini [9]. Atapek, dkk. [10] telah menganalisis bahwa beban tempa panas yang berlebih pada baja AISI 4340 dapat menimbulkan inisiasi retak disebabkan reduksi ukuran terlalu besar dan sifat mampu bentuk serta keuletan yang kurang baik. Laju pendinginan setelah proses *forging* sangat mempengaruhi pembentukan strukturmikro, transformasi maupun fraksi volum fasa yang perlu dikontrol [11]. Pada penelitian Jeddi, dkk. [12], telah menganalisis pengaruh *retained austenite* terhadap penurunan sifat mekanik pada baja paduan Ni-Cr akibat tegangan sisa dari proses transformasi fasa martensitik.

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan dan menganalisis pengaruh variasi pembebanan tempa panas sebesar 50, 75, dan 100 ton pada baja laterit paduan NiCrMn terhadap sifat mekanik mencakup kekerasan, ketahanan impact, dan strukturmikro.

## 2. PROSEDUR PERCOBAAN

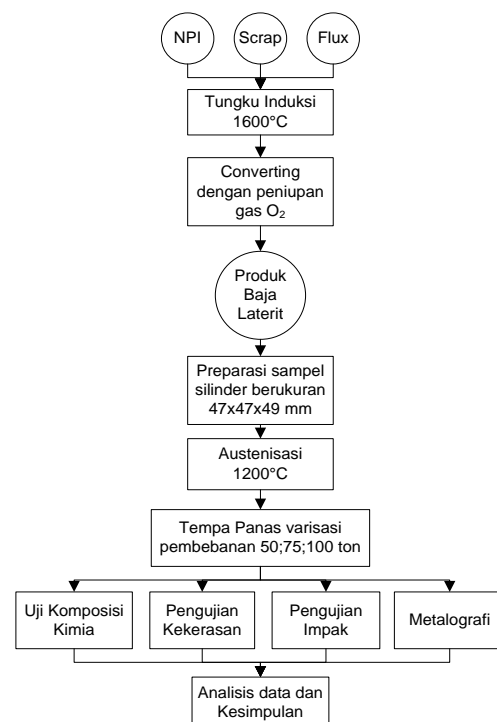
Pada penelitian ini menggunakan bahan baku baja laterit yang diperoleh dari proses peleburan NPI dengan tungku induksi dan pembersihan pengotor dengan *fluxing* kemudian dituangkan ke dalam *ladle converter* dan ditiupkan gas oksigen untuk menurunkan kadar karbon hingga mencapai komposisi standar baja karbon sedang.

Setelah mendapatkan produk baja laterit berpaduan NiCrMn, kemudian dilakukan preparasi ingot menjadi sampel berukuran 47 x 47 x 49 mm seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Sampel kemudian mengalami proses homogenisasi pada temperatur 1200 °C selama 1 jam dilanjutkan dengan proses tempa panas (*hot forging*) dengan variasi beban 50, 75, dan 100 ton. Sampel baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa kemudian didinginkan dalam media oli.



Gambar 1. Foto visual baja laterit paduan NiCrMn dengan ukuran 47 x 47 x 49 mm sebagai sampel awal proses tempa panas

Diagram alir proses penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir yang dilakukan dalam penelitian

Sampel baja laterit paduan NiCrMn hasil cor dikarakterisasi awal dengan pengujian OES (*optical emission spectroscopy*) untuk mengetahui komposisi kimia.

Sampel baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas kemudian dilakukan pengamatan metalografi dengan OM (*optical microscopy*). Pada pengamatan metalografi, dilakukan preparasi sampel metalografi dengan ukuran 10x10x10 mm, kemudian dimounting dengan resin, diampelas dengan kertas ampelas dengan kekasaran 100 s.d 2000 *mesh* dan dipoles dengan pasta alumina dengan kekasaran 5 hingga 0,1 $\mu$ . Sampel baja laterit paduan NiCrMn kemudian dietsa dengan larutan Nital 2%.

Uji impak dengan metode Charpy pada baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas mengacu pada standar ASTM A370 [13] dengan ukuran sampel 10 x 10 x 55 mm dengan *v-notch* di bagian tengah dengan sudut 45°. Uji keras pada baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas dilakukan dengan metode Rockwell C dengan indentasi pada permukaan hasil *grinding* dilakukan sebanyak 5 titik dan diambil kekerasan rata-ratanya.

### 3. HASIL DAN DISKUSI

#### 3.1 Analisis Komposisi Kimia Baja Laterit Paduan NiCrMn

Tabel 2 menunjukkan komposisi kimia baja laterit paduan NiCrMn beserta komposisi kimia dari baja AISI 4340 sebagai acuan.

Tabel 2. Hasil komposisi kimia baja laterit paduan NiCrMn

Unsur	AISI 4340 (%berat)	Baja Laterit NiCrMn (%berat)
C	0,4	0,4910
Mn	0,8	1,8700
Ni	1,85	1,8020
Cr	0,8	1,7100
Fe	Bal	Bal

Hasil analisa komposisi kimia pada Tabel 2 menunjukkan bahwa baja laterit paduan NiCrMn memiliki komposisi kimia mengacu pada baja AISI 4340, dimana unsur karbon dan nikel sesuai dengan komposisi standar baja AISI 4340 [14] dengan modifikasi paduan Mn dan Cr yang cukup tinggi [15].

#### 3.2 Visual Baja Laterit Paduan NiCrMn Hasil Tempa Panas

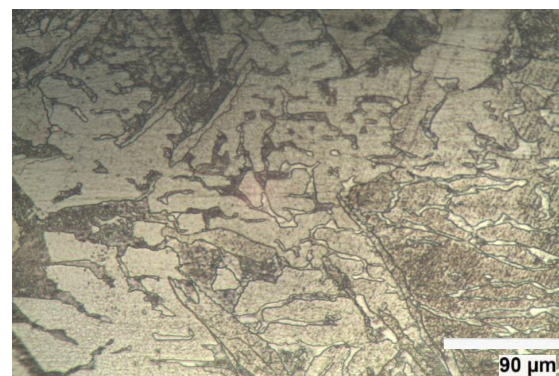
Gambar 3 menunjukkan baja laterit paduan CrNi setelah proses tempa panas dengan persen reduksi 31,72%. Apabila dilihat secara visual dari gambar tersebut, tidak terjadi retakan pada baja laterit paduan NiCrMn setelah proses penempaan dengan % reduksi tertinggi.



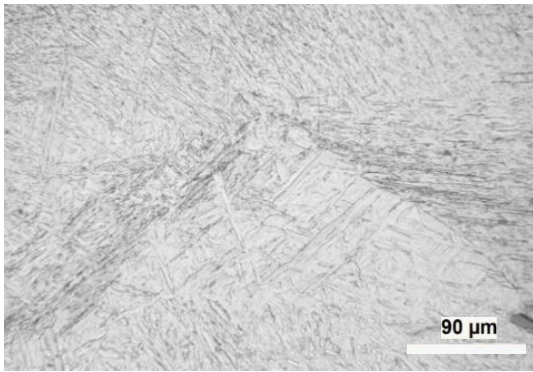
Gambar 3. Foto visual baja laterit paduan NiCrMn setelah proses tempa panas dengan reduksi 31,72%

#### 3.3 Hasil Metalografi pada Baja Laterit Paduan NiCrMn

Gambar 4 menunjukkan strukturmikro dari baja laterit paduan NiCrMn hasil pengecoran dan *converting* dengan cetakan pasir. Struktur yang terbentuk adalah fasa  $\alpha$ -ferit dan perlit dengan batas butir terlihat jelas. Fasa  $\alpha$ -ferit dendritik terbentuk pada saat proses solidifikasi pengecoran dan fasa perlit terbentuk dari transformasi fasa suhu austenisasi dan berdifusinya karbon melalui proses pendinginan yang dilakukan pada suhu kamar [16].

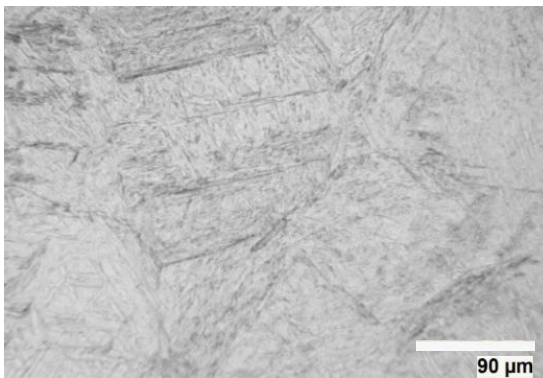


Gambar 4. Strukturmikro baja laterit paduan NiCrMn hasil cor atau *as-cast*. Etsa Nital 2%



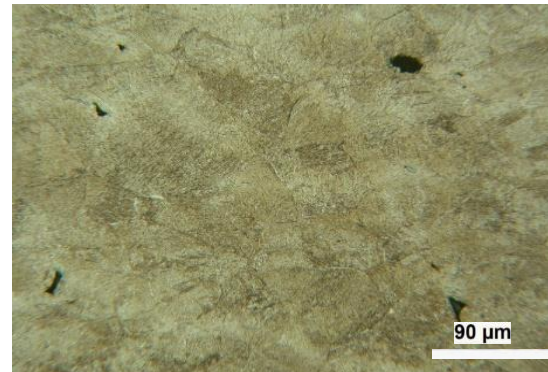
Gambar 5. Strukturmikro baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas pada temperatur 1200 °C dengan beban 50 ton. Etsa Nital 2%

Gambar 5 menunjukkan strukturmikro baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas pada temperatur 1200 °C dengan beban 50 ton atau persen reduksi sebesar 18,06%. Struktur yang terbentuk adalah *fine martensite lath* berbentuk jarum [17]. Ukuran butir martensit lebih halus pengaruh reduksi ukuran dari tempa panas yang mengindikasikan sifat material yang lebih ulet dibandingkan tanpa tempa panas [18].



Gambar 6. Strukturmikro baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas pada temperatur 1200 °C dengan beban 75 ton. Etsa Nital 2%

Gambar 6 menunjukkan strukturmikro baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas pada temperatur 1200 °C dengan beban 75 ton atau persen reduksi sebesar 31,02%. Struktur yang terbentuk adalah dominan fasa martensit berbentuk jarum sebagai matriks dan jelas terlihat butir lebih pipih serta halus.

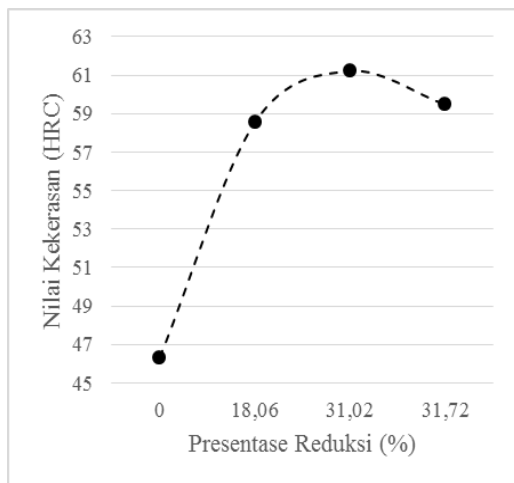


Gambar 7. Strukturmikro baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas pada temperatur 1200 °C dengan beban 100 ton. Etsa Nital 2%

Gambar 7 menunjukkan strukturmikro baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas pada temperatur 1200 °C dengan beban 100 ton atau persen reduksi sebesar 31,72%. Strukturmikro yang terbentuk adalah fasa martensit sebagai matriks, dan adanya austenit sisa. Selain itu, baja laterit NiCrMn dengan kondisi beban tempa di atas ternyata memiliki beberapa porositas maupun retak mikro (*micro crack*). Adanya porositas disebabkan oleh kualitas produk hasil cor dari baja laterit paduan NiCrMn yang masih perlu ditingkatkan, sedangkan retak mikro timbul akibat adanya tahapan reduksi ukuran yang terlalu jauh atau beban tempa yang berlebih. Hal ini bila ditinjau secara mikro akan menyebabkan cacat dislokasi yang memicu hambatan deformasi yang akan menimbulkan adanya tegangan dalam (*internal stress*) pada batas butir dan pada akhirnya akan menginisiasi terjadinya retakan [19]. Penurunan sifat mekanik pada baja laterit paduan NiCrMn pada tahapan reduksi paling tinggi yaitu 31,72 % juga dipengaruhi oleh terbentuknya austenit sisa (*retained austenite*) [17].

### 3.4 Kekerasan Baja Laterit Paduan NiCrMn Hasil Tempa Panas

Gambar 8 adalah grafik antara % reduksi yang diberikan pada baja laterit paduan NiCrMn dengan nilai kekerasan yang dihasilkan.



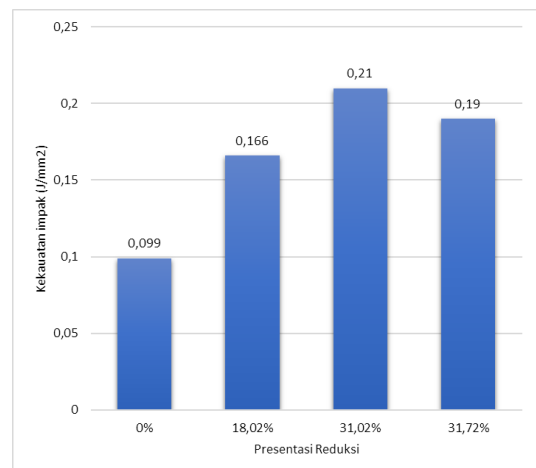
Gambar 8. Grafik hubungan antara persentase reduksi dengan nilai kekerasan pada baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas pada  $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Dari grafik pada Gambar 8 menunjukkan bahwa semakin besarnya persen reduksi yang diberikan pada baja laterit paduan NiCrMn, kekerasan menjadi cenderung meningkat. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh sebesar 61,21 HRC pada persen reduksi 31,02%. Hal ini diperkuat dengan struktur yang terbentuk adalah fasa martensit sebagai matriks. Diketahui bahwa nilai kekerasan dari reduksi 0 %; 18,06 %, dan 31,02 % cenderung naik berturut-turut sebesar 46,32; 58,56; dan 61,21 HRC. Akan tetapi, pada reduksi 31,72 % nilai kekerasan cenderung turun menjadi 59,46 HRC. Karakteristik peningkatan nilai kekerasan pada baja laterit paduan NiCrMn adalah sesuai dengan yang terjadi pada baja AISI 4340 yang memiliki struktur awal ferit-perlit dengan bentuk butiran equiaxial, dimana setelah dilakukan deformasi panas berubah menjadi *elongated grains* yang memicu peningkatan kekerasan [16]. Penurunan nilai kekerasan dari baja laterit paduan NiCrMn pada reduksi tertinggi disebabkan menurunnya suhu austenisasi saat dilakukan tempa. Kondisi ini membuat struktur austenit dalam baja laterit tidak sempat bertransformasi menjadi martensit, sehingga membentuk austenit sisa [17].

### 3.5 Nilai Uji Impak Baja Laterit Paduan NiCrMn Hasil Tempa Panas

Gambar 9 menunjukkan grafik yang menghubungkan antara persen reduksi yang diberikan terhadap nilai kekuatan impact yang diperoleh pada baja laterit paduan NiCrMn hasil tempa panas pada berbagai variasi beban. Grafik pada Gambar 9, menunjukkan bahwa nilai impact pada baja laterit paduan NiCrMn setelah proses tempa panas dengan persen

reduksi 0% ;18,02 %; dan 31,02 % cenderung meningkat dengan nilai impact sebesar 0,099; 0,166; dan 0,21  $\text{J}/\text{mm}^2$ .



Gambar 9. Grafik hubungan antara persentase reduksi dengan nilai impact pada baja laterit paduan NiCr hasil tempa panas  $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tingginya kemampuan baja laterit paduan NiCrMn menyerap energi selain didukung oleh struktur yang terbentuk juga adanya unsur-unsur paduan Ni, Cr dan Mn yang meningkatkan sifat mampu serap energi atau ketangguhan sebagai stabilisasi austenit [20]. Akan tetapi, pada reduksi 31,72% terjadi penurunan kemampuan menyerap energi pada baja laterit paduan NiCrMn dengan nilai impact yang diperoleh sebesar 0,19  $\text{J}/\text{mm}^2$ . Pengaruh dari kualitas hasil cor baja laterit paduan NiCrMn yang masih memiliki porositas atau *microvoid* mengakibatkan material menjadi rapuh sehingga kemampuan menyerap energi menjadi berkurang [21-22].

## 4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan pada baja laterit paduan NiCrMn hasil pengecoran dan *converting* dilanjutkan dengan homogenisasi pada  $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama 1 jam dan proses tempa panas pada  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan variasi beban tempa 50; 75 dan 100 ton atau persen reduksi 18,02%; 31,02%; dan 31,72% dapat disimpulkan bahwa material memiliki komposisi kimia sesuai dengan acuan standar AISI 4340 dengan modifikasi paduan Mn dan Cr yang cukup tinggi. Kekerasan dan kekuatan impact cenderung meningkat sampai reduksi ukuran 31,02% yaitu sebesar 61,21 HRC dan 0,21  $\text{J}/\text{mm}^2$ , dimana peningkatan sifat mekanik dan kekuatan impact didukung oleh struktur yang terbentuk yaitu *fine martensite lath* serta bentuk butir setelah deformasi panas berubah menjadi *elongated grains*. Selain itu unsur

paduan Ni, Cr dan Mn juga mendukung meningkatkan kemampuan menyerap energi pada baja laterit paduan NiCrMn. Penurunan kekerasan menjadi 59,46 HRC dan nilai impak 0,19 J/mm<sup>2</sup> pada reduksi tertinggi sebesar 31,72% disebabkan kualitas bahan pengecoran awal yang masih memiliki porositas atau *microvoid* akibat pendinginan cetakan tidak optimal, serta terbentuknya austenit sisa setelah proses tempa panas dan pendinginan dalam media oli.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material - LIPI yang telah mendanai penelitian ini melalui kegiatan Kompetensi Inti tahun 2017. Ucapan terimakasih juga diberikan kepada para teknisi Keltian Baja dan Dr. Ika Kartika atas bimbingan dan diskusi dalam penulisan makalah ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Astuti, Z. Zulhan, A. Shofi, K. Isnugroho, F. Nurjaman, dan E. Prasetyo, "Pembuatan nickel pig iron (Npi) dari bijih nikel laterit indonesia menggunakan mini blast furnace," *Pros. InSINas*, 2012, pp. 66-71.
- [2] E. Herianto, "Kupola udara panas untuk memproduksi NPI (*nickel pig iron*) dari bijih nikel laterit," *Maj. Metal.*, vol. 28, no. 2, pp. 121-130, 2013.
- [3] B. Bandanadaja, "Modifikasi dan pengembangan baja komersial AISI 4340 menjadi baja tahan peluru," *J. PPT* vol. viii, no. 1, pp. 669-680, 2010.
- [4] A. G. O. M. N. Bassim, "Shear strain localisation and fracture in high strength structural materials," *Manuf. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 69-74, 2008.
- [5] H. Chen, D. Zhao, Q. Wang, Y. Qiang, dan J. Qi, "Effects of impact energy on the wear resistance and work hardening mechanism of medium manganese austenitic steel," *Friction*, vol. 5, no. 4, pp. 447-454, 2017.
- [6] P. K. Jena, P. S. P, dan S. K. K., "Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel," *Rev. Mex. Trastor. Aliment.*, vol. 14, no. 1, pp. 47-53, 2016.
- [7] Yusuf dan E. Herianto, "Pembuatan besi nugget dari pasir besi dan bijih besi laterit: tantangan dan kemungkinan keberhasilannya," *Maj. Metal.*, vol. 23, no. 2, pp. 25-29, 2008.
- [8] B. M. Gurumurthy, Y. M. Shivaprakash, G. S. M. C, S. S. Sharma, dan A. Kini, "Comparative studies on mechanical properties of AISI 4340 high-strength alloy steel under time-quenched and austempered conditions," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, no. 4, pp. 530-535, 2015.
- [9] S. Herbirowo, B. Adjiantoro, dan T. B. Romijarso, "Effects of austenitizing and forging on mechanical properties of MIL A-12560/AISI 4340 steel," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 202, p. 12084.
- [10] S. H. Atapek, "Development of a new armor steel and its ballistic performance," *Def. Sci. J.*, vol. 63, no. 3, pp. 271-277, 2013.
- [11] M. Jahazi dan B. Eghbali, "The influence of hot forging conditions on the microstructure and mechanical properties of two microalloyed steels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 113, pp. 594-598, 2001.
- [12] D. Jeddi dan H. P. Lieurade, "Effect of retained austenite on high cycle fatigue behavior of carburized 14NiCr11 steel," *Procedia Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 1927-1936, 2010.
- [13] ASTM A 370, "Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products," A10.13, pp.18-25, 1992.
- [14] Steel and tube, "High tensile steel-AISI 4340," *stainless.steelandtube.co.nz*, 2012. [Online] Available: <http://stainless.steelandtube.co.nz/wp-content/uploads/2014/06/HighTensileSteel4340.pdf>. [Accessed: 13 Maret, 2018].
- [15] O. Bogdan, "Numerical analysis of casting technology and a-segregation prediction in AISI 4340 forgings products 1 introduction 2 the mathematical model to simulate the solidification process," *Industrial Soft Pub*, pp. 1-12, 2010.
- [16] S. V. Sajadifar, G. G. Yapici, M. Ketabchi, dan B. Bemanizadeh, "High temperature deformation behavior of 4340 steel: Activation energy calculation and modeling of flow response," *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 20, no. 12, pp. 133-139, 2013.
- [17] H. Hou, L. Qi, dan Y. H. Zhao, "Materials science & engineering an effect of austenitizing temperature on

- the mechanical properties of high-strength maraging steel,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 587, pp. 209-212, 2013.
- [18] S. Herbirowo dan B. Adjiantoro, “Characteristic of mechanical and morphological properties of hot rolled laterite steel with variety of size reduction,” *Solid State Phenom.*, vol. 266, pp. 8-12, 2017.
- [19] M. Y. Hasbi, D. P. Malau, dan B. Adjiantoro, “Pengaruh variasi reduksi terhadap kekerasan dan strukturmikro baja laterit melalui pengerolan panas,” *Pros. Semnastek*, no.1, 2016, pp. 1-8.
- [20] G. R. Ebrahimi dan M. Javdani, “Effect of thermo-mechanical parameters on microstructure and mechanical properties of microalloyed steels,” *Brazilian J. Phys.*, vol. 40, no. 4, pp. 454-458, 2010.
- [21] H. Karbasian dan A. E. Tekkaya, “A review on hot stamping,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 15, pp. 2103-2118, 2010.
- [22] P. Taylor, A. Babakhani, dan S. M. R. Ziaei, “Materials and manufacturing processes the microstructure and mechanical properties of hot forged vanadium microalloyed steel the microstructure and mechanical properties of hot forged vanadium microalloyed steel,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 2, pp. 135-139, 2012.

