V11 N2



Permana Andi Paristiawan

Peneliti Pertama Pusat Penelitian Metalurgi dan Material Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia perm001@lipi.go.id

Vinda Puspasari

Peneliti Pertama Pusat Penelitian Metalurgi dan Material Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia vind001@lipi.go.id

Andika Widya Pramono

Peneliti Utama Pusat Penelitian Metalurgi dan Material Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia andika008@lipi.go.id

Bintang Adjiantoro

Peneliti Utama Pusat Penelitian Metalurgi dan Material Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia rade005@lipi.go.id

PENGARUH VARIASI PERSENTASE REDUKSI PADA PROSES PENGEROLAN PANAS TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO BAJA LATERIT

Lateritic ore is one of the raw materials for the steel industry. Lateritic ore processed into laterite steel has more advantages than steel in the market. It has better tensile strength, hardness, corrosion resistance, and welding properties. Lateritic steel is made by performing a casting process. This research aims to investigate the effect of reduction percentage on mechanical properties and microstructure of the lateritic steel after the hot rolling process. The specimens were heated to austenitization temperature at 1000°C for 1 hour before the rolling process. The reduction percentage varies by 10%, 15%, and 20%. Hardness and impact test was conducted using a Rockwell Hardness and Charpy method. The microstructure was observed using an optical microscope. The results showed the optimum hardness of 58 HRC in a hot rolling sample with 20% reduction. The highest impact strength of 46 Joule and ductile fracture took place in this sample. The microstructure of this sample showed a bainitic phase causing lower hardness.

Keywords: Hot Rolling Process, Laterite Steel, Mechanical Properties, Microstructure.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi semakin maju seiring perkembangan zaman sehingga menuntut kita untuk memiliki bahan baku yang berkualitas untuk diproses menjadi produk jadi. Indonesia merupakan negara yang kaya akan bahan alam dan mineral, salah satunya adalah bijih laterit. Menurut Badan Geologi Direktorat Jenderal Mineral Batubara (DJMB) tahun 2013, sumber daya laterit di Indonesia mencapai 3.565 juta ton bijih (lebih dari 3,5 milyar ton) [1]. Bijih laterit merupakan salah satu bahan baku dalam industri baja. Bijih laterit yang sudah diolah menjadi baja laterit memiliki keunggulan dibanding baja yang ada di pasaran, yaitu sifat baja dengan kekuatan tinggi, kekerasan yang tinggi, tahan terhadap korosi, dan mempunyai sifat mampu las yang baik [2]. Oleh karena itu baja laterit bisa menjadi solusi pasar terhadap bahan baku baja nasional.

Bijih laterit memiliki kandungan besi yang rendah dengan kandungan logam pengotor yang tinggi seperti nikel, krom, kobalt, mangan, dan kandungan air yang tinggi [3]. Hal ini yang menyebabkan kualitas dari biji laterit menurun sebagai bahan mentah untuk diproduksi lebih lanjut. Bijih laterit dapat ditingkatkan kualitasnya dengan menurunkan kadar pengotornya dan juga dipadu ulang dengan baja murni yang mempunyai kualitas yang baik [4]. Proses pemaduan logam dapat dilakukan dengan proses pengecoran sehingga diperoleh komposisi baja laterit yang diinginkan [5].

Baja laterit perlu dikembangkan menjadi berbagai macam bentuk dengan proses pembentukan logam agar dapat digunakan sebagai bahan baku industri. Proses pembentukan logam meliputi proses pengerolan, proses penempaan, proses penekukan, dll [6]. Salah satu proses pembentukan logam yang akan dibahas dalam paper ini yaitu proses pengerolan panas. Proses pengerolan merupakan proses pembentukan logam di mana ketebalan logam dikurangi dengan gaya tekan menggunakan dua rol yang bergerak dengan arah yang berlawanan [7]. Proses pengerolan terdiri dari dua macam yaitu proses pengerolan panas dan proses pengerolan dingin. Proses pengerolan panas yaitu proses pengerolan yang dilakukan diatas suhu rekristalisasi logam sedangkan proses pengerolan dingin merupakan proses pengerolan yang dilakukan di bawah suhu

Corresponding Author: perm001@lipi.go.id

rekristalisasi logam [8]. Proses pengerolan panas bertujuan untuk membentuk butir yang bebas dari tegangan sisa dengan memanfaatkan proses *recovery*, rekristalisasi, serta homogenisasi struktur butir akibat cacat inklusi hasil proses pengecoran.



Gambar 1: Perkembangan butir pada proses rekristalisasi [9]

Proses pengerolan panas dapat mengubah bentuk butir dari *elongated* yang umumnya mengalami tegangan sisa menjadi bentuk butir baru yang berukuran besar dan *equiaxed* serta bebas dari tegangan sisa [9]. Gambar 1 menunjukkan butir yang terbentuk pada proses rekristalisasi. Gambar 1Gambar 1Butir yang berukuran besar umumnya memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan butir yang berbentuk *elongated* [10]. Pada penelitian ini dipilih proses pengerolan panas dengan variasi %reduksi untuk mengetahui reduksi paling optimum yang menghasilkan sifat mekanik paling baik. Selain itu proses pengerolan panas juga bertujuan untuk mengurangi cacat pada produk pengecoran serta memperbaiki sifat mekanik baja laterit. Untuk mengetahui karakteristik dari baja laterit yang telah mengalami proses pengerolan panas dapat dilakukan uji kekerasan, uji impak, uji tarik, dan analisis struktur mikro. Hasil dari karakteristik baja laterit ini dapat diaplikasikan dalam berbagai kebutuhan yaitu sebagai material untuk *grinding balls* pada mesin peremuk (*crusher*) dan mesin penggerus (*grinder*) yang membutuhkan nilai kekerasan dan ketangguhan yang tinggi.

2. METODE DAN BAHAN

2.1 Bahan dan alat penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu plat baja laterit yang telah dikembangkan oleh P2MM LIPI, resin epoksi, kertas amplas, pasta alumina, dan larutan Nital 2% untuk melakukan etsa pada material sampel. Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu mesin *grinding* dan *polishing*, gergaji, mesin *rolling*, OES, alat uji impak, alat uji keras, alat uji tarik, mikroskop optik.

2.2 Metode Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan proses mulai dari proses persiapan material, karakterisasi dengan *optical emission spectroscopy* (OES), proses pengerolan panas, karakterisasi dan pengujian. Pada awalnya dilakukan proses persiapan material dengan memastikan material baja laterit bersih dari kerak dan karat yang tebal dengan terlebih dahulu diamplas. Selanjutnya sampel baja laterit dikarakterisasi unsur kimianya dengan menggunakan *optical emission spectroscopy* (OES). Sampel dibagi menjadi dua yaitu sampel tanpa perlakuan dan sampel dengan proses pengerolan panas. Pengerolan dilakukan dengan variasi persentase reduksi yaitu 10%, 15%, dan 20%. Setelah itu dilakukan persiapan sampel untuk proses pengujian mekanik dan karakterisasi struktur mikro. Selanjutnya didapatkan data pengujian dan karakterisasi untuk kemudian diolah dan ditarik kesimpulan.

2.3 Proses pengerolan panas

Proses pengerolan panas dilakukan pada suhu di atas suhu rekristalisasi logam. Plat baja laterit awalnya dipanaskan terlebih dahulu sampai $T = 1000^{\circ}C$ di dalam tungku induksi selama 1 jam agar proses austenisasi berjalan dengan sempurna [11]. Selanjutnya pada plat baja laterit yang telah dipanaskan tersebut dilakukan proses pengerolan panas dengan variasi persentase reduksi yaitu 10%, 15% dan 20%. Setelah proses pengerolan selesai, dilanjutkan dengan penempaan agar bahan hasil pengerolan menjadi lurus. Setelah itu, dilakukan pengujian sifat mekanik dan karakterisasi struktur mikro. Tabel 1 menjelaskan jumlah sampel untuk pengujian sifat mekanik dan karakterisasi struktur mikro.

Tabel 1	1:	Sampel	penguija	n dan	karakterisasi
I GOOL 1		Sumper	pongajia	ii uuii	nulunceriousi

		JUMLAH SAMPEL						
NO	KETERANGAN	DAM/	PENGEROLAN	PENGEROLAN	PENGEROLAN			
NO	RETERANGAN	MATERIAL	PANAS	PANAS	PANAS			
		MATERIAL	REDUKSI 10%	REDUKSI 15%	REDUKSI 20%			
1	Uji kekerasan	1	1	1	1			
2	Uji tarik	1	1	1	1			
3	Uji impak	1	1	1	1			
4	Karakterisasi	1	1	1	1			
	Struktur Mikro	1	1	1				

2.4 Pengujian sifat mekanik

Pengujian sifat mekanik yang dilakukan meliputi uji kekerasan, uji tarik, dan uji impak. Uji kekerasan dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan rata-rata dari sampel. Kekerasan merupakan ketahanan lokal material terhadap pembebanan pada permukaannya [12]. Nilai kekerasan pada suatu sampel akan berpengaruh terhadap sifat mekanik lain seperti kekuatan tarik dan kekuatan impak. Uji kekerasan dilakukan menggunakan metode *Rockwell* tipe C menggunakan indentor berupa kerucut intan dengan beban minor sebesar 10 kgf dan beban mayor sebesar 140 kgf.

Uji tarik dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi persentase reduksi pada proses pengerolan terhadap nilai kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum, dan elongasi yang dihasilkan [13]. Gambar 2 menunjukkan sampel pengujian tarik yang dibuat dengan standard JIS 2201 dan diberi pembebanan aksial sampai material tersebut patah.



Gambar 2: Sampel pengujian tarik

Uji impak dilakukan untuk mengetahui ketahanan material terhadap pembebanan secara tiba-tiba. Gambar 3 menunjukkan sampel uji impak yang dibuat dengan standar ASTM E-23 [14]. Uji impak dilakukan dengan ayunan beban pendulum secara cepat sampai material patah. Karakteristik patahan material akibat pembebanan secara tiba-tiba kemudian diinvestigasi.



Gambar 3: Sampal pegujian kekuatan impak

2.5 Observasi struktur mikro

Obesrvasi struktur mikro diperlukan untuk mengetahui karakteristik butir dan fasa yang terbentuk pada proses pengerolan panas baja laterit dengan variasi %reduksi. Butir dan fasa yang terbentuk dapat mempengaruhi sifat mekanik material. Karakterisasi struktur mikro dilakukan dengan proses metalografi yang meliputi proses pemotongan sampel menjadi ukuran 1x1 cm lalu dilakukan proses *mounting* menggunakan resin epoksi. Selanjutnya dilakukan proses *grinding* menggunakan kertas amplas dari grit 100 sampai grit 2000 agar permukaan sampel terhindar dari oksida. Lalu dilakukan proses *polishing* menggunakan pasta alumina agar sampel terbebas dari goresan hasil *grinding*. Sampel yang telah mengalami proses *polishing* selanjutnya dietsa menggunakan larutan Nital 2% dan diamati menggunakan mikroskop optik.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Hasil pengujian optical emission spectroscopy (OES)

Unsur-unsur yang terkandung dalam baja laterit dapat dilihat pada Tabel 2.

Unsur	с	Cr	Ni	Mn	Si	S	Р	Sn	AI
Kadar	0,49%	1,71%	1,80%	1,87%	0,23%	0,007%	0,013%	0,004%	0,20%
Unsur	Zr	Cu	Zn	Мо	Nb	Ті	v	w	Fe
Kadar	0,03%	0,027%	0,015%	0,074%	0,007%	0,007%	0,008%	0,03%	Balance

Tabel 2: Hasil OES sampel baja laterit

Hasil OES menunjukkan baja laterit memiliki paduan Ni, Mn, dan Cr yang lebih dominan dibanding kadar unsur lainnya selain Fe. Kadar unsur paduan pada baja laterit termasuk rendah (kurang dari 10%) sehingga disebut baja paduan rendah. Baja laterit ini memiliki kadar C sebanyak 0,49% yang menandakan baja karbon medium [15]. Hasil analisis komposisi kimia pada Tabel 2 menunjukkan bahwa baja laterit paduan Ni-Cr-Mn memiliki komposisi kimia yang mengacu pada baja AISI 4340. Dapat dilihat pada Tabel 3, unsur karbon dan nikel dari baja laterit mendekati komposisi standar baja AISI 4340 [16]. Hanya saja unsur Mn dan Cr dari baja laterit nilainya lebih tinggi dari baja AISI 4340.

Tabel 3: Komposisi unsur AISI 4340 [16].

Unsur	С	Ni	Cr	Mn	Мо	Si	Fe
Kadar	0.38	1.74	0.97	0.61	0.72	0.45	Balance

3.2 Hasil karakterisasi struktur mikro

Struktur mikro dapat menunjukkan karakteristik morfologi butir dan fasa yang dapat mempengaruhi sifat mekanik material seperti kekerasan, kekuatan tarik maupun kekuatan impak. Struktur mikro sampel baja laterit diamati menggunakan mikroskop optik.



Gambar 4: Struktur mikro sampel *raw material*



Gambar 5: Struktur mikro sampel reduksi 10%

Gambar 4 menunjukkan fasa α -ferit yang berwarna terang dan perlit yang berwarna gelap dengan batas butir terlihat jelas pada bahan baku baja laterit. Fasa α -ferit dan perlit terbentuk dari transformasi fasa suhu austenisasi dan berdifusinya karbon melalui proses pendinginan yang dilakukan pada suhu kamar. Terlihat adanya inklusi yang merupakan cacat hasil proses pengecoran. Gambar 5 menunjukkan struktur mikro baja laterit dengan reduksi pengerolan panas 10% berupa *fine lath martensit* berbentuk jarum yang berwarna gelap. Ukuran butir martensit yang lebih halus pada Gambar 5 merupakan pengaruh reduksi dari pengerolan panas yang mengindikasikan sifat material yang lebih ulet dibandingkan tanpa pengerolan panas [17].



Gambar 6: Struktur mikro sampel reduksi 15%



Gambar 7: Struktur mikro sampel reduksi 20%

Gambar 6 menunjukkan struktur mikro baja laterit dengan reduksi pengerolan panas 15% berupa fasa bainit dan terlihat lebih rapat tetapi ukuran butirnya cenderung kecil. Kekerasan fasa bainit berkisar 20-65 HRC. Fasa bainit cenderung ulet dan diperoleh ketika baja dari suhu austenit didinginkan dengan laju pendinginan yang hampir sama dengan laju pendinginan kritisnya [18]. Gambar 7 menunjukkan struktur mikro baja laterit dengan reduksi pengerolan panas 20% berupa fasa bainit yang terlihat sangat jelas. Pola garis pada fasa bainit yang searah menunjukkan bahwa elongasi butir yang searah dengan arah pengerolan. Fasa bainit pada Gambar 7 memiliki butir yang lebih besar dibanding pada Gambar 6 dengan kekuatan dan kekerasan yang lebih rendah.

3.3 Hasil pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan mengambil data kekerasan pada lima titik yang berbeda pada sampel



dan dengan nilai rata-rata seperti tertera pada Gambar 8.

Gambar 8: Hasil uji kekerasan sampel plat baja laterit

Kekerasan material yang paling tinggi adalah bahan baku baja laterit tanpa proses pengerolan yaitu sebesar 64,77 HRC sedangkan kekerasan yang paling rendah adalah material baja laterit dengan pengerolan panas menggunakan variasi reduksi 20% dengan nilai kekerasan 58 HRC. Kekerasan semakin menurun seiring dengan peningkatan variasi reduksi pengerolan [19]. Hal ini menunjukkan adanya proses recovery, rekristalisasi serta grain growth seiring penambahan reduksi pada proses pengerolan panas sehingga membuat butir yang awalnya berbentuk elongated menjadi lebih besar membentuk struktur butir wrought structure [20]. Ukuran butir yang semakin besar akan menurunkan kekerasan material. Selain itu, adanya perbedaan fasa juga mempengaruhi kekerasan material [21]. Sampel baja laterit dengan reduksi pengerolan panas sebesar 20% memiliki fasa bainit dengan butir yang lebih besar yang dapat dilihat pada Gambar 7 sehingga memiliki kekerasan lebih rendah dibanding raw material yang memiliki fasa α-ferit dan perlit dengan butir yang berbentuk elongated yang dapat dilihat pada Gambar 4 [22].

3.4 Hasil pengujian kekuatan tarik

Tabel 4: Hasil pengujian tarik spesimen plat baja laterit

Kekuatan tarik pada plat baja laterit hasil pengerolan dapat dilihat pada Tabel 4.

NO	KETERANGAN	σ _u (MPa)	ε (%)
1	Raw material	1456	27.7
2	Reduksi 10 %	1720	29.2
3	Reduksi 15 %	1580	31.3
4	Reduksi 20 %	864	33





Gambar 9: Hasil uji kekuatan tarik sampel plat baja laterit

Gambar 10: Hasil elongasi sampel plat baja laterit

Gambar 9 menunjukkan hasil kekuatan tarik sampel baja laterit. Kekuatan tarik sampel baja laterit hasil pengerolan semakin menurun nilainya seiring dengan penambahan variasi reduksi proses pengerolan. Hal ini menunjukkan adanya proses *recovery*, rekristalisasi dan dilanjutkan proses *grain growth* seiring penambahan reduksi pada proses pegerolan panas. Adanya proses *recovery*, rekristalisasi, dan fenomena *grain growth* seiring penambahan reduksi pada sampel dengan reduksi 15% membuat butir berbentuk lebih bulat dan bebas dari tegangan sisa sehingga menurunkan kekuatan tariknya. Seiring pembahan reduksi fenomena *grain growth* semakin besar dan mempengaruhi nilai kekuatan tarik sampel. Kekuatan tarik minimum diperoleh pada sampel baja laterit dengan proses pengerolan panas menggunakan reduksi 20% yaitu 864 MPa. Beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan tarik yaitu suhu pemanasan, laju pendinginan, serta transformasi struktur mikro dan senyawa yang terbentuk [23]. Nilai kekuatan tarik yang paling kecil terjadi pada sampel dengan reduksi 20% dikarenakan butir yang semakin besar (mengalami fenomena *grain growth*) terlihat pada Gambar 7. Menurut *Hall-Petch equation*, semakin besar ukuran butir maka semakin kecil kekuatan tariknya.

Gambar 10 menunjukkan hasil elongasi sampel plat baja laterit dimana elongasi terbesar yaitu 31,3% terjadi pada sampel baja laterit dengan pengerolan panas menggunakan reduksi sebesar 15%. Pengerolan panas dengan reduksi 10% ke 15% mengakibatkan material baja laterit mengalami peningkatan elongasi. Hal ini menandakan bahwa tingkat kemampuan bahan untuk memanjang dan bersifat ulet pada proses pengerolan panas terjadi ketika sampel direduksi sebesar 10% dan 15%. Hal ini menandakan dari hasil uji tarik, tingkat reduksi yang baik dilakukan pada reduksi 10% dan 15%.

3.5 Hasil Pengujian Kekuatan Impak

Kekuatan impak material menunjukkan ketahanan material terhadap pembebanan impak. Kekuatan impak dapat dilihat pada energi yang terserap oleh spesimen selama pembebanan impak sampai material tersebut patah [24]. Semakin besar energi yang diserap maka material semakin ulet dan mengalami patah ulet.



Gambar 11: Hasil uji kekuatan impak sampel baja laterit

Gambar 11 menunjukkan hasil uji kekuatan impak sampel baja laterit. Nilai kekuatan impak paling tinggi adalah pada sampel plat baja laterit dengan reduksi 20% pada proses pengerolan yaitu sebesar 46 Joule. Hal ini menunjukkan material tersebut bersifat ulet sehingga dapat menyerap energi sampai material tersebut patah [25]. Bentuk patahan pada sampel dengan reduksi 20% juga menunjukkan patahan serabut yang mencirikan patah ulet (*ductile fracture*) seperti tertera pada Gambar 12.



Gambar 12: Bentuk patahan sampel plat baja laterit pada uji kekuatan impak

4. KESIMPULAN

Baja laterit memiliki kadar C sebanyak 0,49% yang menandakan baja karbon medium. Kekerasan semakin menurun seiring dengan penambahan variasi reduksi pengerolan. Kekerasan tertinggi yaitu pada sampel tanpa reduksi adalah sebesar 64,77 HRC yang memiliki fasa α-ferit dan perlit. Kekerasan yang paling rendah adalah material baja laterit dengan pengerolan panas variasi reduksi 20% yaitu sebesar 58 HRC dengan fasa bainit dengan butir yang besar. Kekuatan tarik sampel baja laterit reduksi pengerolan panas 10% ke 15% menunjukkan fenomena semakin meningkatnya kekuatan material. Namun pada reduksi 20% nilai kekuatan tarik menurun dikarenakan butir yang semakin membesar. Kekuatan tarik minimum didapat pada sampel baja laterit dengan reduksi pengerolan panas sebesar 20% yaitu 864 MPa. Nilai energi terserap tertinggi hasil uji impak yaitu 46 Joule, diiringi patah ulet terjadi pada sampel baja laterit pengerolan panas dengan reduksi 20%.

5. PERNYATAAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material-LIPI yang telah mengizinkan melakukan penelitian ini dan semua pihak yang telah bekerja sama dari tim peneliti maupun teknisi Baja Unggul Nasional Berbasis Laterit.

6. DAFTAR PUSTAKA

- PRASETYO, P., "Sumber daya mineral di Indonesia khususnya bijih nikel laterit dan masalah pengolahannya sehubungan dengan UU Minerba 2009", Dalam: *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, pp. 1-10, Jakarta, Nov. 2016.
- [2] SUBAGJA, R., PRASETYO, B., SARI, W.M., "Peningkatan kadar nikel dalam laterit jenis limonit degan cara peletasi, pemanggangan reduksi dan pemisahan magnet campuran bijih, batu bara, dan Na2SO4", Jurnal Material Metalurgi., v. 31, n. 2, pp. 103–115, Aug. 2016.
- [3] SIAHAAN, E., dan RIZA, A., "The effect of hot rolling on hardness properties and microstructure of laterite steel", In: Proceeding of Tarumanagara International Conference on the Applications of Technology and Engineering: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 508, Jakarta, May. 2019.
- [4] HERBIROWO, S., HAKIM, L., ADJIANTORO, B., "Microstructure and mechanical characteristics of hot forged lateritic steels", In: *International Mechanical and Industrial Engineering Conference 2018:* MATEC Web of Conferences, v. 24, pp. 1–6, Malang, Sep. 2018.
- [5] WANG, Y., CHEN, Y., WEI, H., ZHAO, Y., LIU, Z., "Effect of hot rolling process parameters on microstructure transformation and microstructure of 45MnSiV steel", *Materials Science Forum*, v. 944, pp. 265–271, Jan. 2019.
- [6] PRAMUDIA, M., dan ROMADHON, A. S., "Pengaruh variasi ukuran bola baja pada proses dry shoot

peening terhadap mikrostruktur dan kekerasan material implan AISI 316L", *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 9, n. 3, pp. 169–172, Dec. 2018.

- [7] DENG, G. Y. *et al.*, "Evolution of microstructure, temperature and stress in a high speed steel work roll during hot rolling: Experiment and modelling", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 240, pp. 200–208, Oct. 2017.
- [8] DONG, Q., CAO, J., WEN, D., "Spalling prevention and wear improvement of rolls in steel strip hot-rolling process", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, v. 15, pp. 626-632, Oct. 2015.
- [9] CALLISTER, W. D., and RETHWISCH, D. G., *Fundamental of materials science and engineering: an integrated approach*, 4 Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc, 2012
- [10] WIDODO, T. D., dan RAHARJO, R., "Pengaruh *ball peening* terhadap kekerasan baja tahan karat AISI 316L", *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 7, n. 3, pp. 151–155, 2016.
- [11] LIU, Z. et al., "Microstructure evolution and mechanical property of low-alloy steel used for armor layer of flexible pipe during thermomechanical process and hot rolling process", *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 28, pp. 107-116, Nov. 2019.
- [12] BUDIYANTO, E., CHOIRON, A., dan DARMADI, D. B., "Hardening baja AISI 1045 menggunakan gel aloe vera sebagai media pendingin", Jurnal Rekayasa Mesin, v. 7, n. 2, pp. 55–64, 2016.
- [13] SUJITNO, T., MULYANI, E., ANDRIYATI, W., SUHARLAN, D., and MALAU, V., "Effect of diamond-like carbon thin film on the fatigue strength of AISI 4340", *Advances in Materials*, v. 8, n. 1, pp. 21–26, March. 2019.
- [14] HAN, J. *et al.*, "The effects of prior austenite grain boundaries and microstructural morphology on the impact toughness of intercritically annealed medium Mn steel", *Acta Materialia*, v. 122, pp. 199–206, Jan. 2017.
- [15] JAFARLOU, H., HASSANNEZHAD, K., ASGHARZADEH, H., & MARAMI, G. R., "Enhancement of mechanical properties of low carbon steel joints via graphene addition", *Materials Science and Technology*, v. 34, n. 4, pp. 455–467, Dec. 2017.
- [16] HASSANPOUR, H., SADEGHI, H., RASTI, A., and SHAJARI, S., "Investigation of Surface Roughness, Microhardness and White Layer Thickness in Hard Milling of AISI 4340 Using Minimum Quantity Lubrication", *Journal of Cleaner Production*, v. 120, pp. 124-134, 2016.
- [17] CAI, Z. H., DING, H., XUE, X., and XIN, Q. B., "Microstructural evolution and mechanical properties of hot-rolled 11 % manganese TRIP steel", *Materials Science & Engineering A*, v. 560, pp. 388–395, 2013.
- [18] LIU, Z. et al., "Microstructure Evolution and Mechanical Property of Low-Alloy Steel Used for Armor Layer of Flexible Pipe During Thermomechanical Process and Hot Rolling Process", *Journal of Materials Engineering and Performances*, v. 28, pp. 107-116, 2019.
- [19] PLATOV, S. I., NEKIT, V. A., and MASLENNIKOV, K. B., "Strength, ductility and impact toughness of tube steels after hot rolling", In: *IOP Conference Series: Materias Science and Engineering*, v. 709, n. 3, Jan. 2020.
- [20] FRAS, T., ROTH, C. C., MOHR, D., "Fracture of high-strength armor steel under impact loading", *International Journal of Impact Engineering*, v. 111, pp. 147-164, Jan. 2018.
- [21] RIDLO, F.M., PARISTIAWAN, P.A., UTAMA, D.P., CITRAWATI, F., "Study on the effect of solution treatment soaking time on structure development of modified FeNiMn steels", *AIP Conference Proceedings*, v. 2232, n.1, 2020.
- [22] ALSHWIGI, M., PUTATUNDA, S.K., and BOILEAU, J., "Metallurgy and Metal Physics Development of Dual Phase Microstructure in Medium Carbon Low Alloy Steel by Continuous Cooling Heat Treatment," *International Journal of Metallurgy and Metal Physics*, v. 3, n. 2, pp. 1-13, Oct. 2018.
- [23] PRASETYO, M.A., PUSPASARI, V., ANWAR, M.S., NIKITASARI, A., MABRURI, E., "Mechanical properties of modified cast martensitic stainless steel CA6NM with addition of molybdenum and nitrogen", AIP Conference Proceedings, v. 2232, n.1, 2020.
- [24] KIM, B. et al., "Effects of Ni and Cu addition on cryogenic-temperature tensile and charpy impact properties in austenitic 22Mn-0.45Ce1Al steels", *Journal of Alloys and Compounds*, v. 815, n. 152407, Jan, 2020.
- [25] TAKASHIMA, Y., "Fracture toughness evaluation for dissimilar steel joints by Charpy impact test," Welding in the World, v. 63, pp. 1243–1254, June. 2019.