

APLIKASI SEVERE PLASTIC DEFORMATION (SPD) DAN HEAVY COLD ROLLING PADA BAJA TAHAN KARAT AUSTENITIK 316L

Efendi Mabruri

Pusat Penelitian Metalurgi – LIPI
Kawasan Puspiptek Serpong, Gedung 470, Tangerang 15314
E-mail : efendi_lipi@yahoo.com

Masuk tanggal : 23-02-2012, revisi tanggal : 12-03-2012, diterima untuk diterbitkan tanggal : 21-03-2012

Intisari

APLIKASI SEVERE PLASTIC DEFORMATION (SPD) DAN HEAVY COLD ROLLING PADA BAJA TAHAN KARAT AUSTENITIK 316L. Untuk meningkatkan kekuatan baja tahan karat austenitik, penghalusan butir sampai ukuran submikron (*ultra fine grain*) merupakan metoda yang efektif. Tulisan ini melaporkan aplikasi *severe plastic deformation* (SPD) menggunakan *equal channel angular pressing* (ECAP) dan aplikasi *heavy cold rolling* terhadap baja tahan karat austenitik SS 316L. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sifat mekanik baja tahan karat austenitik 316L dapat ditingkatkan secara signifikan masing-masing dengan kedua teknik tersebut. ECAP *pass 1* (*single pass*) dengan regangan 0,65 dapat meningkatkan kekuatan tarik baja tahan karat austenitik 316L menjadi 1,6 kali lipat, sedangkan *heavy cold rolling* 80 % dengan regangan 1,65 dapat meningkatkan kekuatan tarik menjadi 2,1 kali lipat. Pemanasan anil pada suhu 750 °C menurunkan kekuatan tarik menjadi 1055,14 MPa tetapi nilai tersebut masih jauh lebih tinggi dari kekuatan tarik pada kondisi awal (*solution treatment*) sebesar 655,53 Mpa.

Kata kunci : Baja tahan karat austenitik, Penghalusan butir, Severe plastic deformation, Equal channel angular pressing, Heavy cold rolling

Abstract

THE APPLICATION OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION (SPD) AND HEAVY COLD ROLLING OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL 316L. The grain refinement down to ultrafine sizes is the effective method for strengthening of austenitic stainless steel. This paper reports the application of *severe plastic deformation* (SPD) using *equal channel angular pressing* (ECAP) and the application of *heavy cold rolling* on the austenitic stainless steel (SS) 316L. The experimental results showed that the mechanical properties of SS 316L can be increased significantly by these two techniques. The single pass-ECAP with 0.65 strain increased tensile strength of SS 316L by 1.6 times, whereas heavy cold rolling with 80% reduction and 1.65 strain increased tensile strength by 2.1 times. The annealing treatment at 750 °C decreased tensile strength of 80 % cold rolled-SS 316L down to 1055.14 Mpa, however this value is still much larger compared to that of solution treated ones of 655.53 Mpa.

Keywords : Austenitic stainless steel, Grain refinement, Severe plastic deformation, Equal channel angular pressing, Heavy cold rolling

PENDAHULUAN

Baja tahan karat austenitik (SS 3xx) banyak digunakan di berbagai aplikasi karena memiliki ketahanan korosi, ketangguhan dan mampu las yang bagus. Akan tetapi baja tahan karat austenitik memiliki kekuatan luluh (*yield strength*) yang rendah sehingga membatasi aplikasi

pada struktur kekuatan rendah^[1-2]. Untuk meningkatkan kekuatan baja tahan karat austenitik, penghalusan butir sampai ukuran submikron (*ultra fine grain*) merupakan teknik yang efektif^[3-5]. Dalam dekade terakhir perkembangan teknologi material memungkinkan penghalusan butir/struktur logam sampai ke tingkat ukuran butiran ultra halus/*ultra fine*

grained/UFG (100-500 nm) atau nano meter (<100 nm) untuk memaksimalkan efek penguatan pada material^[6-7]. Material dengan struktur submikron/nano memiliki sifat yang jauh lebih tinggi dari pada material konvensional yang memiliki struktur /butiran yang besar (*coarse grain*). Saat ini terdapat empat teknik untuk mendapatkan material struktur nano^[8-9], yaitu: konsolidasi serbuk nanopartikel; deposisi kimia, fisika dan elektrokimia; kristalisasi material amorf; dan deformasi sangat plastis. Di antara teknik-teknik tersebut, deformasi sangat plastis merupakan teknik yang paling banyak mendapat perhatian karena menghasilkan material yang bebas porositas, 100% padat dengan ukuran benda kerja yang relatif cukup besar untuk aplikasi struktur komersial^[8,10,11]. Deformasi sangat plastis (*severe plastic deformation / SPD*) merupakan proses pengerjaan logam yang memberikan regangan yang sangat besar tanpa merubah penampang melintang benda kerja^[12]. Hal ini sangat berbeda dengan proses pengerjaan logam konvensional dimana logam mengalami perubahan penampang melintang setelah dideformasi. SPD menghasilkan logam/paduan berstruktur submikron/nano dan memiliki densitas dislokasi yang tinggi sehingga mempunyai kekuatan mekanik yang jauh lebih tinggi (sampai 200%) dibandingkan logam/paduan yang berbutir besar yang dihasilkan oleh metoda deformasi konvensional seperti pengerolan, ekstrusi dan lain-lain^[12-13]. *Equal channel angular pressing* (ECAP) merupakan metoda SPD yang paling efisien dan banyak mendapat perhatian untuk pengembangan material struktur nano^[14]. ECAP memiliki lubang cetakan yang membentuk sudut sehingga material mengalami regangan geser tetapi penampang melintang material dipertahankan tidak berubah setelah keluar dari cetakan^[15-16].

Teknik lain untuk struktur butiran yang halus terutama untuk aplikasi pada baja tahan karat austenitik adalah *advanced*

thermomechanical process, yang meliputi pengerolan dingin konvensional dan anil^[17]. Tetapi karena melibatkan % reduksi yang sangat besar, teknik ini disebut juga *heavy cold rolling* dan *annealing*. Teknik ini lebih cocok dibandingkan ECAP untuk diaplikasikan terutama pada pengembangan produk pelat berkekuatan tinggi. Baja tahan karat austenitik dapat dirol dalam keadaan dingin sampai reduksi yang sangat besar bahkan sampai lebih dari 90 % karena baja ini memiliki struktur kristal FCC yang memiliki jumlah sistem slip yang lebih banyak dari pada struktur kristal BCC yang dimiliki oleh baja feritik. Pada suhu kamar baja tahan karat austenitik memiliki fasa austenit yang metastabil secara termodinamik, yang dapat ditransformasikan menjadi fasa martensit (*strain-induced martensite*) dengan deformasi pada suhu di bawah M_{d30} . Melalui pemanasan anil martensit ini kemudian dapat dikembalikan menjadi austenit dengan butiran yang lebih halus dari austenit awal.

Beberapa percobaan ECAP terhadap CP-Ti (*commercial purity titanium*) yang memiliki struktur kristal yang sama dengan baja tahan karat austenitik (FCC) telah dilakukan dan dipublikasikan oleh penulis^[18-19]. Pada tulisan ini dilaporkan hasil percobaan masing-masing teknik ECAP dan *heavy cold rolling-annealing* terhadap baja tahan karat austenitik 316L. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk mengetahui perubahan kekuatan tarik dan struktur mikro baja tahan karat austenitik 316L setelah diaplikasikan masing-masing kedua teknik tersebut.

PROSEDUR PERCOBAAN

Material

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja tahan karat austenitik seri 316L dengan diameter 0,5 inchi (12,7 mm) yang diperoleh dari pasaran. Komposisi baja dianalisa dengan *optical emission*

spectrometer (OES) yang ditampilkan pada Tabel 1. Dari komposisi tersebut baja tahan karat austenitik dikategorikan ke dalam seri 316L. Untuk percobaan ECAP, baja dipotong menjadi ukuran panjang 70 mm dengan ukuran diameter yang tetap (12,7 mm). Sedangkan untuk percobaan *rolling*, dibuat sampel berukuran 5 x 12 x 70 mm (tebal x lebar x panjang). Sebelum dilakukan percobaan ECAP atau *heavy cold rolling*, semua sampel dilakukan pemanasan *solution treatment* pada suhu 1200 °C selama 30 menit untuk menjamin struktur austenitik yang seragam.

Tabel 1. Komposisi baja tahan karat austenitik 316L yang digunakan di dalam penelitian berdasarkan analisa OES

Unsur	C	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe
% Berat	0,02	0,02	0,02	1,57	11,87	19,45	1,86	Sisa

ECAP

Alat ECAP memiliki lubang (lorong) dengan diameter tertentu yang membentuk sudut yaitu sudut dalam Φ dan sudut busur lengkung terluar (sudut luar) Ψ . Regangan yang diterima sampel setelah melalui lubang ECAP sejumlah N kali *pass* diberikan oleh formula berikut^[16]:

$$\epsilon_n = N \left[\frac{2 \cot g \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right)}{\sqrt{3}} \right]$$

Pada percobaan ini *dies* untuk ECAP didisain memiliki rongga internal berukuran diameter 14 mm dan bersudut dalam $\Phi=120^\circ$ dan sudut luar $\Psi=7^\circ$. Susunan alat ECAP yang digunakan ditampilkan pada Gambar 1. Percobaan ECAP dilakukan dengan memasukkan sampel ke dalam lubang *dies* ECAP kemudian ditekan oleh penekan (*punch*) sampai seluruh bagian sampel melewati belokan (sudut) lubang *dies*. Penekanan *punch* dilakukan oleh mesin pres hidrolik

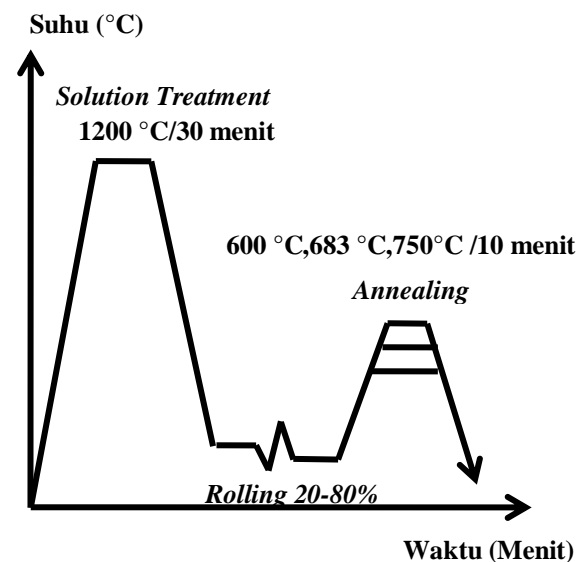
dengan kecepatan tertentu. Sampel kemudian dilakukan pengujian kekerasan, pengujian tarik dan struktur mikro.



Gambar 1. Susunan alat ECAP yang memiliki lubang dalam membentuk sudut 120°

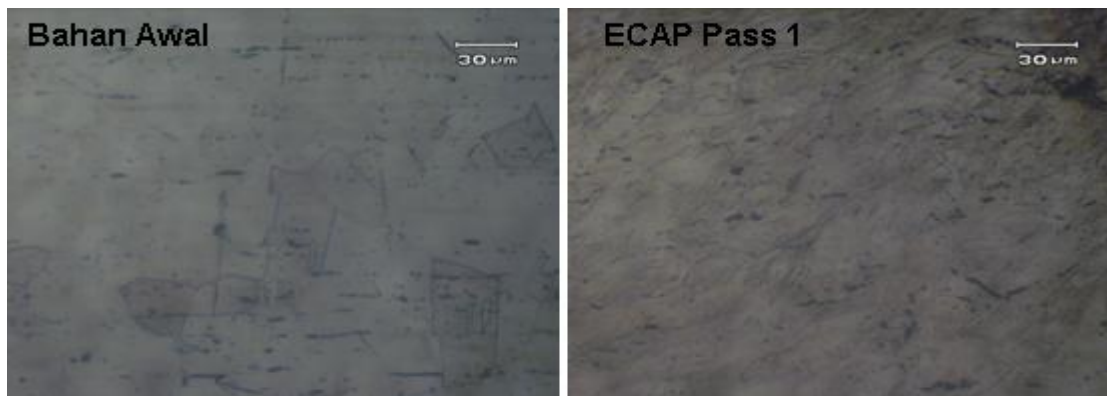
Heavy Cold Rolling dan Annealing

Percobaan pengerolan dilakukan dengan bertahap (*multi pass rolling*) pada suhu kamar dengan prosentasi reduksi tebal maksimal 84 %. Ketebalan pelat berkurang dari 5 mm menjadi sekitar 0,7 mm. Setelah dilakukan pengerolan, kemudian sampel dilakukan pemanasan anil pada suhu 600, 683 dan 750 °C di dalam tungku *fluidized bed* yang dialiri gas Argon UHP (*ultra high purity*). Sampel kemudian dilakukan pengujian kekerasan, pengujian tarik dan struktur mikro. Skema proses *rolling* dan *annealing* ditunjukkan pada Gambar 2.

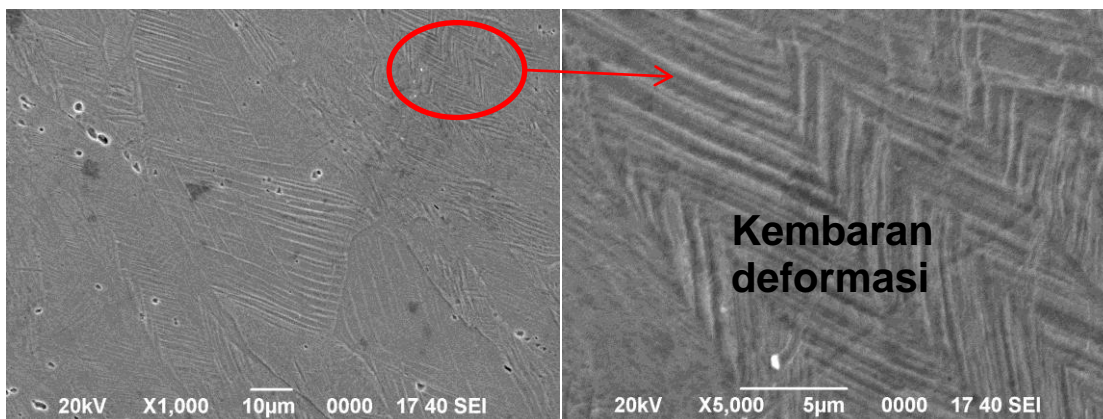


Gambar 2. Skema proses *rolling* dan *annealing*

HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 3. Gambar mikroskop optik struktur mikro baja tahan karat 316L sebelum ECAP (awal) dan setelah ECAP *pass* 1 ($\epsilon = 0,65$)



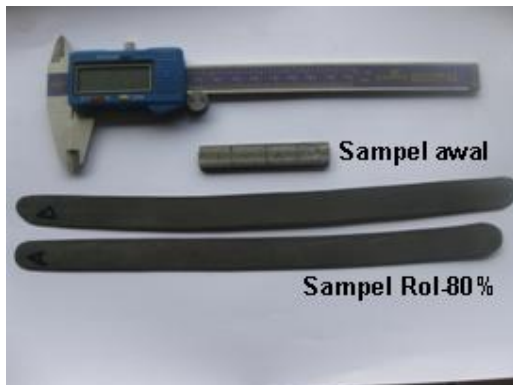
Gambar 4. Gambar SEM struktur mikro baja tahan karat 316L setelah ECAP *pass* 1

Gambar 3 menunjukkan struktur mikro baja tahan karat austenitik 316 L awal sebelum dideformasi (kondisi *solution treatment*) dan struktur mikro setelah ECAP *pass* 1 (*single pass*). Secara kualitatif, dari gambar tersebut terlihat perbedaan struktur butiran yang cukup signifikan dimana struktur mikro sampel ECAP memiliki butiran relatif lebih kecil dan memanjang akibat deformasi ECAP. Penurunan ukuran butiran ini berkaitan dengan regangan plastis yang besar yang diterima sampel. Pada percobaan ini die ECAP yang didisain memberikan regangan 0,65 untuk satu kali *pass*. Butiran-butiran kasar dipecah dengan terbentuknya pita-pita geser (*shear band*) yang terbentuk akibat regangan plastis. Secara umum defromasi plastis terjadi karena terjadi pergeseran bidang atom melalui bidang slip atau terbentuknya kembaran deformasi

(*deformation twin*). Gambar 4 merupakan gambar SEM yang menunjukkan adanya kembaran deformasi pada sampel baja tahan karat 316L setelah ECAP *pass* 1. Karena baja tahan karat 316L memiliki SFE (*stacking faults energy*) yang rendah, mekanisme kembaran deformasi akibat pengerjaan dingin pada baja tahan karat 316L mendominasi daripada mekanisme slip seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.

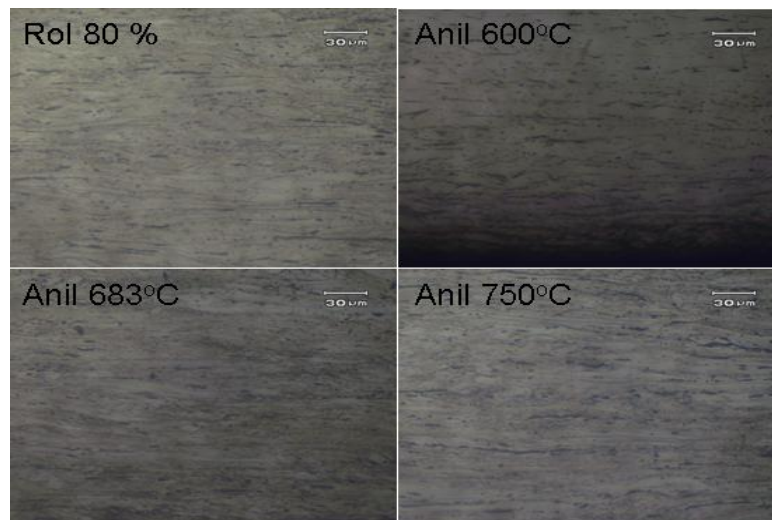
Heavy cold rolling dengan reduksi 80 % pada sampel 316L menghasilkan pelat tanpa cacat rol dengan penurunan ketebalan yang signifikan dari 5 mm menjadi sekitar 0,8 mm dengan panjang sekitar empat kali panjang awal seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Kemampuan menerima regangan yang besar pada baja 316 L ini dikaitkan dengan struktur kristal yang dimiliki yaitu FCC yang memiliki 12 sistem *slip* dibandingkan dengan struktur

kristal BCC yang tidak mempunyai bidang *close packed* sebagai bidang *slip*. Dari kemampuannya menerima regangan plastis yang besar ini dapat dikatakan baja 316L berperilaku superplastis. Struktur mikro setelah *heavy cold rolling* dengan reduksi 80 % dan setelah pemanasan anil pada suhu 600, 683 dan 750 °C ditampilkan pada Gambar 6. Struktur mikro setelah pengerolan dingin 80 % menunjukkan struktur elongasi yang berlipat-lipat akibat deformasi yang besar. Dari gambar mikroskop optik tersebut belum dapat diamati terjadinya transformasi martensit akibat regangan pengerolan. Setelah dilakukan anil, struktur mikro terlihat mengalami perubahan yaitu struktur elongasi yang semakin membesar.

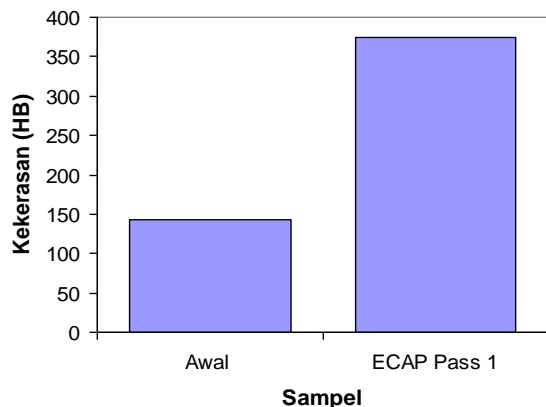


Gambar 5. Sampel baja tahan karat 316 L sebelum dan sesudah pengerolan dingin 80 %

Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran kekerasan (HB) terhadap sampel baja 316L sebelum dan setelah ECAP *pass* 1. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kekerasan baja 316L setelah *pass* ke-1 ECAP (setara dengan regangan 0,65) meningkat lebih dari 2 kali dari kekerasan sebelumnya. Peningkatan kekerasan ini merupakan efek kombinasi dari penurunan ukuran butir berdasarkan relasi *Hall-Petch* dan peningkatan densitas dislokasi akibat regangan geser selama proses ECAP. Untuk nilai kekerasan (HB) sampel yang dilakukan pengerolan dingin ditampilkan pada Gambar 8. Dari gambar tersebut terlihat bahwa secara umum kekerasan baja 316L meningkat dengan meningkatnya prosentasi reduksi pengerolan dingin. Kekerasan baja 316L meningkat tajam sampai reduksi sekitar 50 % dan peningkatan kekerasan melandai pada reduksi dari 50 % ke atas. Analisis awal dari kecenderungan seperti ini adalah bahwa pada reduksi awal sampai sekitar 50 % terjadi dua kemungkinan yang dominan dibandingkan pada reduksi 50 % ke atas, yaitu peningkatan yang tajam pada densitas dislokasi dan peningkatan yang tajam pada pembentukan fasa martensit. Sehingga selanjutnya diperkirakan bahwa pada reduksi di atas 50 % peningkatan jumlah dislokasi dan fasa martensit sudah bergerak lambat menuju titik maksimum.



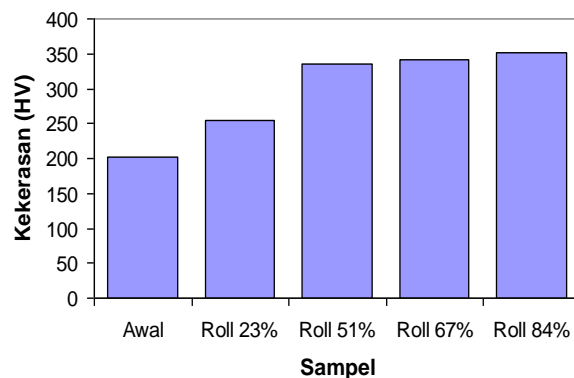
Gambar 6. Gambar mikroskop optik struktur mikro setelah *heavy cold rolling* dengan reduksi 80 % dan setelah pemanasan anil



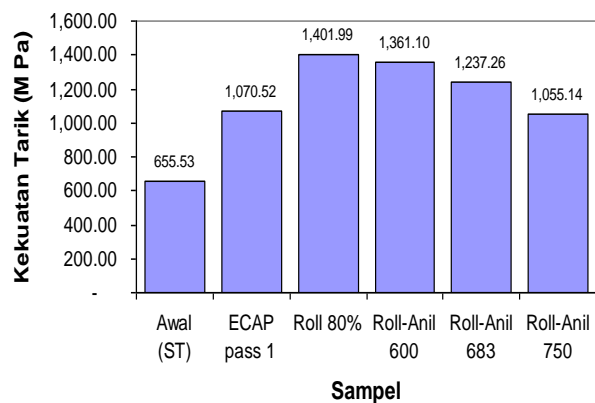
Gambar 7. Kekerasan (HB) sampel baja tahan karat austenitik 316L sebelum dan setelah ECAP *pass* 1

Kekuatan tarik maksimum (UTS) untuk sampel baja tahan karat austenitik 316L pada kondisi awal (*solution treatment*), setelah ECAP *pass* 1, setelah pengerolan dingin 80 % dan setelah anil disajikan pada Gambar 9. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kekuatan tarik baja tahan karat austenitik 316L meningkat 1,6 kali lipat dari 655,53 Mpa menjadi 1070,52 Mpa setelah dilakukan ECAP *pass* 1 (regangan 0,65) dan meningkat 2,1 kali lipat dari 655,53 Mpa menjadi 1401,99 Mpa setelah dilakukan pengerolan dingin 80 % (regangan 1,65). Peningkatan kekuatan tarik yang tajam pada sampel ECAP dan rol-80% ini biasanya dibarengi dengan penurunan keuletan (% elongasi). Pemanasan anil tentunya akan memperbaiki keuletan (meningkatkan % elongasi). Dari Gambar 9 perlakuan anil terhadap sampel rol-80% menurunkan kekuatan tarik dan semakin tinggi suhu anil kekuatan tariknya semakin menurun. Pemanasan anil pada suhu 750 °C menurunkan kekuatan tarik menjadi 1055,14 MPa tetapi nilai tersebut masih relatif jauh lebih tinggi dari kekuatan tarik pada kondisi awal (*solution treatment*) sebesar 655,53 Mpa dan tentunya dengan harga % elongasi yang lebih tinggi dari pada sampel rol-80% tanpa anil. Suhu pemanasan anil harus dipilih agar mendapatkan kombinasi yang bagus antara kekuatan tarik yang masih tinggi dan

keuletan yang dapat diterima untuk aplikasi struktur.



Gambar 8. Kekerasan (HV) sampel baja tahan karat austenitik 316L sebelum dan sesudah pengerolan dingin



Gambar 9. Kekuatan tarik maksimum (UTS) sampel baja tahan karat austenitik 316L

KESIMPULAN

Dari percobaan yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa sifat mekanik baja tahan karat austenitik 316L dapat ditingkatkan secara signifikan masing-masing dengan teknik ECAP (*equal channel angular pressing*) dan teknik *heavy cold rolling*. Teknik ECAP *pass* 1 dengan regangan 0,65 dapat meningkatkan kekuatan tarik baja tahan karat austenitik 316L menjadi 1,6 kali lipat, sedangkan *heavy cold rolling* 80 % dengan regangan 1,65 dapat meningkatkan kekuatan tarik menjadi 2,1 kali lipat. Perlakuan anil terhadap sampel rol-80% menurunkan kekuatan tarik dan semakin tinggi suhu anil kekuatan tariknya semakin menurun.

Pemanasan anil pada suhu 750 °C menurunkan kekuatan tarik menjadi 1055,14 MPa tetapi masih relatif jauh lebih tinggi dari kekuatan tarik pada kondisi awal (*solution treatment*) sebesar 655,53 Mpa.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai oleh kegiatan *In-House Research* Pusat Penelitian Metalurgi (P2M) LIPI. Penulis mengucapkan terima kasih kepada teknisi Laboratorium Rekayasa dan Karakterisasi Material Bidang Metalurgi Fisik dan Manufaktur, P2M-LIPI yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J.R. Davis. 1994. *Stainless Steel: ASM Specialty Handbook* : Metals Park, O.
- [2] A.F. Padilha, R.L. Plaut, P.R. Rios. 2003. *ISIJ Int.* : 43, 135–143.
- [3] B.P. Kashyap, K. Tangri. 1995. *Acta Metall. Mater.* : 43, 3971.
- [4] Rybal'chenko, S.V. Dobatkin, L.M. Kaputkina, G.I. Raan, N.A.Krasilnikov. 2004. *Mater. Sci. Eng.* : A387–A389, 244.
- [5] Y. Murata, S. Ohashi, Y. Uematsu. 1993. *ISIJ Int.* : 33, 711–720.
- [6] M.Greger, R.Kocich, B.Kuřetová, M.Vlček. 2007. *Acta Metallurgica Slovaca.* : 13 (4), 561-569.
- [7] Q. Wei. 2007. *Journal Of Materials Science.* : 42, 1709–1727.
- [8] Zbigniew Pakieła et al. 2006. *Proc. Nukleonika.* :51 (Supplement 1):S19–S25.
- [9] K.Y. Zhu a, A. Vassel b, F. Brisset c, K. Lu d, J. Lu. 2004. *Acta Materialia.* : 52, 4101–4110.
- [10] Yuntian T. Zhu and Terence G. Langdon. 2004. *Journal Of Metals.* : 58-63.
- [11] R. Z. Valiev. 2007. *Journal Of Materials Science.* : 42, 1483–1490.
- [12] Terry C. Lowe. 2006. *Journal Of Metals.* : 28-32.
- [13] K. J. Kurzydowski. 2004. *Bulletin of The Polish Academy of Sciences: Technical Sciences.* : 52 (4), 301-311.
- [14] I.Kim, J.Y. Kim, D.H. Shin, and K.T. Park. 2003. *Metallurgical and Materials Transactions A:* 34A , 1555-1558.
- [15] G.M. Stoica and P.K. Liaw. 2001 *Journal Of Metals.* : 36-40.
- [16] S. Ruzs and K. Malanik. 2007. *Archives of Materials Science and Engineering.* : 28 (11), 683-686.
- [17] R. Song, D. Ponge, D. Raabe, J.G. Speer, D.K. Matlock. 2006. *Mater. Sci. Eng.* :A441, 1–17.
- [18] E.Mabruri, B.Sriyono, S.Mulyaningsih, Solihin. 2010. „Penghalusan Butir Titanium Murni untuk Aplikasi Biomedis dengan teknik Equal Channel Angular Pressing”. *Majalah Metalurgi.* : 25 (1).
- [19] E.Mabruri, B.Sriyono, S.Mulyaningsih, Solihin. 2009. „Pemrosesan CP-Ti Struktur Ultra Halus dengan Deformasi Sangat Plastis Menggunakan Teknik Equal Channel Angular Pressing (ECAP)”. *Prosiding Seminar Material Metalurgi.* Indonesia.

RIWAYAT PENULIS

Efendi Mabruri, Lulus Sarjana Teknik Pertambangan ITB tahun 1995, Master Teknik Material ITB tahun 2002 dan Doctor of Engineering bidang Materials Science and Engineering dari Nagoya University, Jepang tahun 2008. Bekerja sebagai peneliti sejak tahun 1996 dan sekarang sebagai Kepala Bidang Konservasi Bahan di Pusat Penelitian Metalurgi LIPI.

