

Kekerasan pada Daerah Lubang Baja Aisi 316L Yang Dideformasi Plastis

UripAgus Salim¹⁾, Suyitno¹⁾, Rahadian Magetsari²⁾, Muslim Mahardika¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik

²⁾Fakultas Kedokteran

Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM

Yogyakarta, Indonesia (55281)

Phone: +62-274-521673, FAX: +62-274-521673, E-mail: urip-as@ugm.ac.id

Abstrak

Komponen-komponen mesin yang mempunyai lubang berpotensi mengalami kegagalan lebih awal dari pada bagian yang lain. Selain diakibatkan oleh konsentrasi tegangan, kegagalan itu dapat bermula dari terbentuknya cacat mikro akibat proses permesinan. Cacat-cacat mikro itu dapat merambat melalui mekanisme perambatan retak dan kelelahan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi kegagalan adalah dengan menerapkan deformasi plastis pada lubang (pengerjaan dingin). Pendeformasian secara plastis yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan sebuah mandrel berkepala bola yang terbuat dari baja amutit dan berkontak langsung dengan lubang benda kerja yang terbuat dari baja AISI 316L. Diameter kepala bola dibuat berturut-turut 5 mm, 5.5 mm, dan 6 mm. Sedangkan benda kerja terbuat dari baja AISI 316L dengan ketebalan 3 mm dan lubang berdiameter 4 mm.

Semakin besar diameter kepala bola yang digunakan semakin besar pula perluasan lubang yang dihasilkan. Peningkatan kekuatan daerah di sekitar lubang dievaluasi menggunakan angka kekerasan vickers. Dari data pengujian menunjukkan bahwa tingkat kekerasan pada bagian yang dekat dengan lubang lebih tinggi dari pada daerah yang jauh dengan lubang. Peningkatan kekerasan bahan disebabkan oleh mekanisme pembentukan bidang-bidang slip secara meluas.

Keywords: *perluasan lubang, AISI 316L, kepala bola, deformasi plastis, kekerasan, bidang slip*

Pendahuluan

Lubang-lubang pada suatu komponen mesin yang biasa dibuat dengan cara *machining* (seperti *drill*, *boring* atau *milling*) mengakibatkan setidaknya dua pelemahan sekaligus pada struktur. Pertama, terjadi konsentrasi tegangan disekitar lubang yang mengakibatkan kerusakan awal (gagal tegangan) pada struktur. Kedua, akibat proses permesinan muncul cacat mikro yang mengakibatkan terjadi intensitas tegangan di ujung cacat. Dalam kondisi regangan-bidang, cacat ini menyebabkan patah getas. Sedangkan dalam kondisi tegangan-bidang cacat mikro ini dapat merambat akibat beban berulang sehingga kegagalan lelah bisa terjadi. Untuk menghambat perambatan retak pada lubang biasanya dilakukan perlakuan perluasan lubang melalui proses deformasi dingin dengan alat bantu mandrel (Arora dan Simha 1996), maupun *split-sleeve* (Lee dan Yeh, 1997, Pavier dkk., 1999, Field dkk., 2004, Maximov dkk., 2008). Metode ini mula-mula

untuk penyiapan lubang-lubang rivet maupun baut. Dalam perkembangannya metode ini juga diaplikasikan pada industri pembuatan bejana tekan (Arora dan Simha, 1996).

Motivasi penggunaan baja tahan karat AISI 316L pada penelitian ini adalah untuk mengembangkan bahan ini sebagai pelat implan medis yang dapat diproduksi secara masal. Baja tahan karat yang pertama kali digunakan untuk pembuatan implan adalah baja 18-8 (tipe 302 dalam klasifikasi modern), yang lebih kuat dan lebih tahan terhadap korosi dari pada baja vanadium. Baja vanadium tidak lagi digunakan sebagai implan sejak ketahanan korosinya tidak mencukupi dalam *invivo*. Selanjutnya baja tahan karat Mo 18-8 dikenalkan yang mengandung sejumlah prosentase kecil Mo untuk memperbaiki ketahanan korosi dalam larutan klorida (air garam). Paduan ini menjadi dikenal sebagai baja tahan karat tipe 316. Pada tahun 1950 kandungan karbon baja tahan karat 316 diturunkan dari 0,08 % menjadi sejumlah maksimum 0,03 % untuk ketahanan korosi yang lebih baik pada larutan klorida dan untuk meminimalkan sensitifitasnya, kemudian dikenal sebagai

baja tahan karat 316L. Konsentrasi efektif minimum dari kromium adalah 11 % untuk memberikan sifat ketahanan korosi dalam baja tahan karat. Kromium adalah suatu unsur reaktif, tetapi ia dan paduannya dapat dipasifasi oleh 30% asam nitrat untuk memberikan ketahanan korosi unggul.

Baja tahan karat austenitik, khususnya tipe 316 dan 316L, paling banyak digunakan untuk fabrikasi implan. Baja ini tidak dapat dikeraskan dengan perlakuan panas tetapi dapat dikeraskan dengan kerja dingin. Kelompok baja tahan karat ini adalah tidak bersifat magnetik dan mempunyai ketahanan korosi yang lebih baik dari pada jenis baja lain. Inklusi molibdenum memperbaiki ketahanan terhadap korosi *pitting* dalam air garam. ASTM merekomendasikan tipe 316L dari pada tipe 316 untuk pembuatan implan. Perbedaan antara baja tahan karat tipe 316 dan 316L hanya pada kandungan maksimum karbon yaitu masing-masing 0,08 % dan 0,03 %. Nikel menstabilkan fase austenit (γ , struktur fcc) pada suhu ruangan dan meningkatkan ketahanan korosi. Formasi fase austenit dapat dipengaruhi oleh kandungan keduanya Ni dan Cr seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6 untuk baja tahan karat kandungan karbon 0,1 %. Jumlah minimum Ni untuk mempertahankan fase austenit adalah sekitar 10%.

Aplikasi baja tahan karat 316L untuk keperluan struktur pada umumnya dibatasi oleh kekuatan tarik dan ketahanan lelehnya yang rendah (Chen dkk., 2005). Upaya-upaya untuk meningkatkan kekuatan material ini telah dilakukan dengan beberapa cara antara lain menambahkan unsur-unsur kimia paduan untuk mendapatkan larutan padat (*solid solution*) (Pelletier dkk., 2002, Rawers dkk., 1996) dan penghalusan ukuran butir (Fujiwara and Ameyama, 1999; Ucok dkk., 1991). Beberapa teknik penghalusan butir yang pernah dilakukan oleh beberapa peneliti adalah milling mekanis, pengerolan dingin dan deformasi plastis menyeluruh. Pada proses milling mekanis, serbuk baja 316L dicampur secara mekanis sebelum dilakukan sintering pada temperatur 1173 K selama 60 menit, sehingga dihasilkan ukuran butir yang halus (sekitar 250 nm) (Fujiwara and Ameyama, 1999). Peningkatan kekerasan mencapai 4,4 kali dibanding baja 316L konvensional. Teknik pengerolan dingin yang dilanjutkan dengan proses anil pada temperatur 973 K telah menghasilkan kekuatan luluh sebesar 1280 MPa (Ucok dkk., 1991). Teknik deformasi plastis menyeluruh yang telah dilakukan oleh Valiev dan Langdon (2006) telah mendapatkan butiriran sebesar 65 nm. Ketiga proses di atas memiliki kelemahan, yaitu terjadinya transformasi

martensit disamping proses penghalusan butir. Terbentuknya martensit akan mengurangi ketahanan korosi pada material (Brooks, 1979). Selain itu, proses tersebut membutuhkan energi yang besar untuk menghasilkan penghalusan butir menyeluruh.

Peningkatan sifat mekanis pada permukaan baja 316L juga telah dikembangkan dengan mekanisme penghalusan butir. Proses ini dilakukan terutama untuk mendapatkan baja 316L yang memiliki ketahanan leleh yang lebih baik untuk aplikasi pada komponen yang mengalami beban berulang. Kegagalan material karena beban berulang umumnya dimulai pada permukaan, dengan butiran halus pada permukaan maka proses inisiasi kegagalan akan terhambat. Penghalusan butir pada level nano ditujukan pada permukaan sampai kedalaman sekitar sepuluh mikrometer telah dikerjakan oleh (Liu dkk., 2000; Lu dan Lu, 2004; Chen dkk., 2005). Proses yang telah dilakukan terdiri dari: *surface mechanical attrition treatment (SMAT)* (Lu dan Lu, 2004; Chen dkk., 2005; Roland dkk., 2006; Roland dkk., 2007) and *ultrasonic shot peening (USP)* (Liu dkk., 2000). Metode SMAT telah berhasil menurunkan ukuran butir secara drastis dan meningkatkan ketahanan leleh. Metode *ultrasonic shot peening* juga berhasil menurunkan ukuran butir permukaan, namun hasilnya tidak sebaik metode SMAT. Proses lain yang telah dikembangkan untuk menghaluskan butir permukaan adalah *sandblasting* (Wang dan Li, 2003), namun sejauh ini belum ada laporan tentang aplikasi proses ini pada baja 316L.

MetodaEksperimen&FasilitasyangDigunakan

Benda ujiterbuat dari pelatbaja AISI 316L dengan tebal 3 mm. Pelat baja dipotong menjadi ukuran 25 mm x 20 mm dan bagian tengahnya dibuat lubang berdiameter 4 mm. Benda kerja diletakkan pada sebuah penjepit yang dapat menahan pergerakan pada satu sisi, sedangkan sisi lainnya dibebaskan. Lubang pada benda uji dideformasi menggunakan *penetrator* berkepala bola masing-masing berdiameter 5 mm, 5,5 mm, dan 6 mm. Penetrasi dilakukan menggunakan dongkrak hidrolik pada laju sekitar 8×10^{-3} mm/detik. Mekanisme pendeformasian lubang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Mekanisme pendeformasian lubang

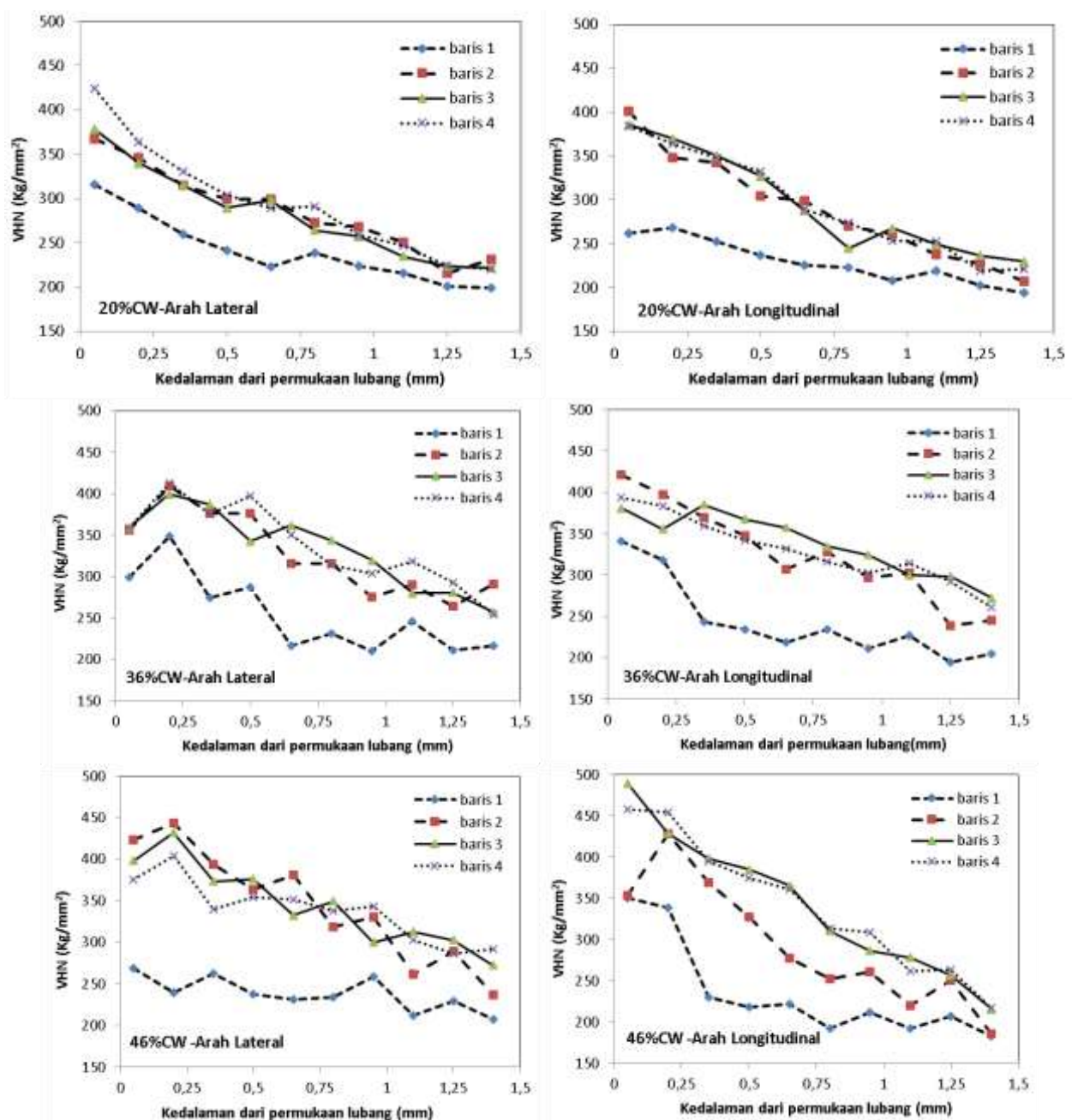
Benda uji yang sudah dideformasi dipotong ke arah membujur dan melintang. Pada bidang-bidang potong ini kemudian diuji kekerasannya menggunakan skala Vickers dan dilihat struktur butirannya di bawah mikroskop optik.

Hasil dan Pembahasan

Diameter-diameter lubang benda uji yang telah dideformasi menggunakan *penetrator* berkepala bola masing-masing diameter 5, 5,5 dan 6 mm adalah 4,85, 5,45 dan 5,90 mm. Perbedaan diameter lubang terdeformasi yang terhadap diameter kepala *penetrator* menunjukkan adanya bagian elastis bahan sehingga lubang beratraksi ke

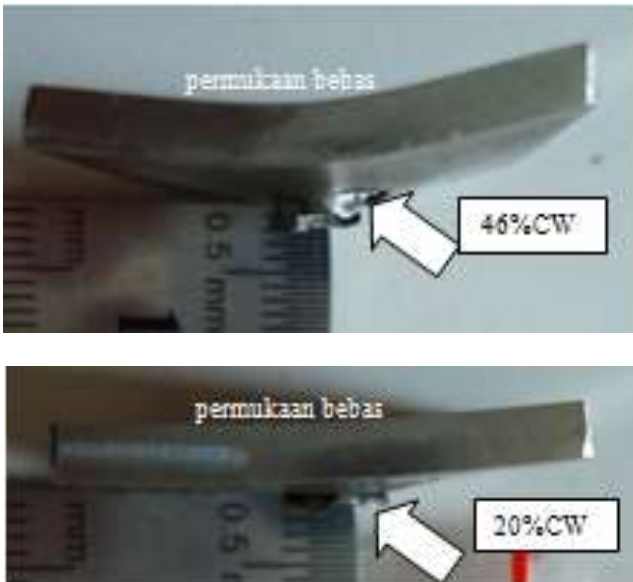
arah dalam. Dengan data-data ini dapat dihitung besarnya persentase pengerjaan dingin rata-ratanya adalah 20%, 36% dan 46%.

Angka kekerasan Vickers pada daerah disekitar lubang ditunjukkan pada Gambar 2 yang membandingkan perbedaan besaran kekerasan untuk persentase pengerjaan dingin (% CW, *Coldworking*) yang berbeda. Baris-baris pengukuran didasarkan atas kedalaman yang diukur dari permukaan atas benda uji (permukaan yang kontak pertama dengan kepala *penetrator*). Baris -1, -2, -3 dan -4 menunjukkan kedalaman sebesar 0,375, 1,125, 1,875 dan 2,625 mm dari permukaan atas. Sedangkan arah kedalaman (sumbu-x) diukur dari permukaan lubang yang telah terdeformasi.



Gambar2. Grafikkekerasanterhadapbendaujisetelah dideformasi plastis

Dengan membandingkan kekerasan bahan dasar yang mempunyai VHN 150 Kg/mm², maka semua benda uji yang telah dideformasi mengalami peningkatan kekerasan yang cukup signifikan hingga mencapai 200% (pada 46%CW), yaitu pada daerah-daerah sekitar kedalaman 0.15 mm. Pada pengerjaan dingin rendah (20%CW) kekerasan bahan meningkat seiring dengan mendekati ke permukaan lubang dan maksimum pada daerah paling dekat dengan permukaan lubang. Sedangkan pada pengerjaan dingin tinggi (35%CW dan 46%CW) kekerasan maksimum terjadi pada daerah yang sedikit lebih ke dalam (sekitar 0,20 mm dari permukaan lubang) sedangkan daerah yang paling dekat dengan lubang cenderung rendah. Hal ini bisa dijelaskan bahwa pada pengerjaan dingin tinggi daerah paling dekat dengan permukaan mengalami kerusakan geseran yang ditunjukkan oleh sisa geseran membentuk tatal (*debris*) pada lubang sisi keluarnya *penetrator* (Gambar 3). Sedangkan pada 20%CW tatal terbentuk hanya pada daerah ujung keluarnya *penetrator*.



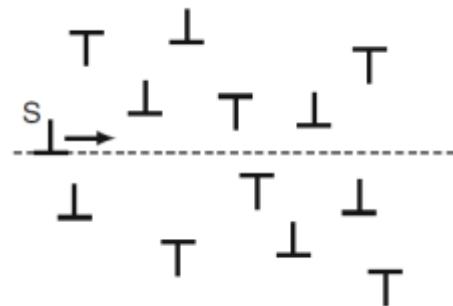
Gambar 3. Tatal sisa geseran oleh *penetrator* pada 46%CW

Pada daerah dekat dengan permukaan bebas (baris-1) kekerasan lebih rendah dari pada daerah yang lebih dalam (baris 2 dan -3). Pada baris-4 kekerasan menunjukkan nilai yang juga lebih tinggi karena daerah ini dekat dengan permukaan tertahan. Rendahnya kekerasan pada daerah dekat permukaan bebas dimungkinkan oleh terjadinya relaksasi, yang mana energi regangan dapat terlepas dengan mudah dibandingkan daerah yang lebih dalam.

Secara umum telah terjadi kekerasan yang tinggi pada daerah yang terdeformasi plastis besar (dekat dengan permukaan lubang) dibandingkan yang mengalami deformasi kecil (jauh dari permukaan lubang). Kekerasan pada arah lateral (ke arah bidang/sisi

tertahan) dan pada arah longitudinal (ke arah bidang/sisi bebas) menunjukkan nilai yang tidak begitu berbeda. Ini menunjukkan bahwa menahan atau membebaskan satu sisi ketika melakukan deformasi plastis tidak mempengaruhi gradien perubahan kekerasan yang terjadi.

Mekanisme deformasi plastis terhadap satu bahan-bahan teknik secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada tahap-tahap awal deformasi plastis bahan membentuk dislokasi-dislokasi baru dengan melipat gandakannya. Kerapatan dislokasi tidak sangat tinggi dan dislokasi terdistribusi dalam pita-pita slip yang terbentuk sangat merata. Dislokasi-dislokasi bergerak dalam medan tegangan internal memanjang terhadap semua dislokasi-dislokasi yang lain (Gambar 4). Dislokasi-dislokasi itu paralel dengan kedua tanda dianggap terdistribusi secara acak. Interaksi elastis timbal balik antara dua dislokasi yang saling melewati pada bidang paralel memunculkan istilah tegangan internal. Tegangan internal rata-rata dikarakterisasi sebagai tegangan yang diperlukan untuk melewati hutan dislokasi yang mempunyai kerapatan dislokasi tertentu. Tegangan internal rata-rata untuk perambatan dislokasi adalah proporsional terhadap modulus geser dan akar kerapatan dislokasi. Peningkatan komponen tegangan internal karena kerapatan dislokasi yang meningkat disebut pengerasan kerja atau pengerasan regangan.



Gambar 4. Arah gerakan dislokasi S melalui dislokasi-dislokasi acak lainnya

Dislokasi-dislokasi dengan distribusi acak yang seperti itu biasa terjadi pada tahap awal deformasi. Dengan peningkatan regangan, struktur dislokasi menjadi heterogen dengan daerah kerapatan dislokasi rendah dan yang lain kerapatan tinggi. Struktur yang demikian itu disebut struktur sel. Struktur dislokasi heterogen yang ditandai sebagai pita-pita slip teguh (*persistent slip bands*, PSBs) terbentuk selama deformasi berulang (*fatigue*). Jika dislokasi pada daerah padat membentuk struktur *dipolar*, tegangan rentang-jauh tidak terjadi dan radius terluar dapat dipakai sebagai jarak antara dislokasi-dislokasi dalam dipole. Jika jarak ini lebih rendah daripada jarak antara dislokasi rata-rata, maka energi regangan total

lebih rendah daripada yang terjadi pada distribusi merata. Struktur dislokasi energi rendah (*low energy dislocation structures*, LEDs) tanpa medan tegangan rentang-jauh seperti ini adalah salah satu dasar teori pengerasan kerja (model Kuhlmann-Wilsdorf).

Dislokasi-dislokasi dapat juga membentuk struktur dengan energi lebih tinggi daripada yang terjadi pada distribusi merata dalam model pengerasan Taylor. Ini dapat terjadi jika dislokasi-dislokasi mempunyai arah yang sama menumpuk melawan beberapa rintangan. Pada kasus ini medan-medan tegangan dislokasi individu saling menguatkan untuk membentuk medan tegangan rentang-jauh. Rintangan itu mungkin berupa produk terkait reaksi dislokasi tertentu, seperti batas butir atau fasa. Energi interaksi yang melawan antara dislokasi tergantung pada spasi-spasi relatif. Penetapan medan tegangan rentang-jauh dengan pengaturan dislokasi seperti tumpukan-tumpukan adalah basis teori pengerasan kerja yang diusulkan oleh Seeger.

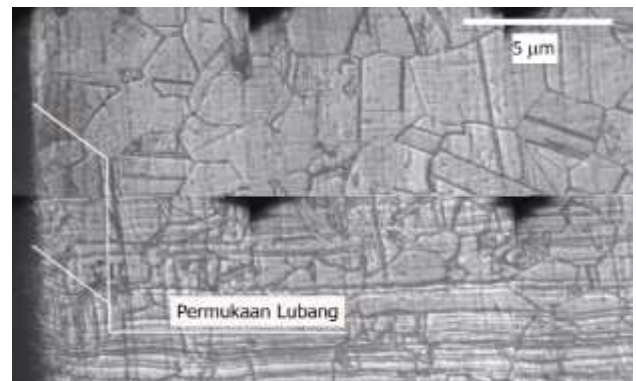
Suatu pendekatan yang lebih realistis pada struktur dislokasi heterogen yang terbentuk oleh deformasi dan tegangan internalnya adalah model komposit (model Mughrabi). Pada model komposit kristal terdeformasi dengan sel atau struktur dinding diperlakukan sebagai bahan komposit yang terdiri atas kerapatan dislokasi rendah dan tinggi. Dengan mengikuti kerapatan dislokasi berbeda, tegangan alir lokal pun berbeda. Besarnya tegangan alir pada model komposit menggunakan aturan campuran (*rule of mixture*) yang melibatkan fraksi luasan keras dan fraksi luasan lunak.

Perbedaan tegangan aksi lokal dapat dipahami sebagai konsekuensi dari tegangan internal rentang-panjang. Dengan tanpa aksi tegangan eksternal, dinding-dinding dislokasi keras terdiri atas dislokasi tersimpan secara statistik, umumnya dalam konfigurasi *dipole* energi-rendah. Ketika deformasi bermula pada bagian dalam sel lunak, dislokasi ditahan pada bagian dinding sel keras dan membentuk dislokasi tidak-cocok (*misfit*). Dislokasi perlu geometri (*geometrically necessary dislocations*, GNDs) mengakomodasi ketidak sesuaian elastis antara bagian keras dan lunak. GNDs itu adalah sumber tegangan internal rentang-panjang yang diperlukan untuk deformasi kompatibel simultan seluruh kristal. Jika tegangan cukup tinggi untuk deformasi dinding keras, flux dislokasi menjadi sama dalam dinding dan sel lunak. Dislokasi dalam dinding sel yang terbentuk selama pembentukan slip jamak tidak mewakili GNDs. Dinding ini dapat disebut batas dislokasi *incidental*, dimana dinding kusut dan lembaran dislokasi terbentuk selama deformasi dalam pengerasan kerja tahap II yang terdiri atas GNDs.

Model komposit mempresentasikan suatu jembatan antara struktur dislokasi energi-rendah dan teori-teori pengerasan kerja tumpukan dislokasi. Pada model ini,

tegangan internal rentang-panjang dihasilkan dari ketidak homogenan kerapatan dislokasi, tanpa perlu membangkitkan eksistensi tumpukan dengan konsentersasi tegangan yang sangat tinggi. Model ini berlaku jika tidak terjadi runtuh dislokasi. Runtuhan dislokasi terjadi hanya dalam bahan yang membentuk dislokasi baru dengan mekanisme slip silang-ganda. Kehadiran runtuh dislokasi dapat berkontribusi pada tegangan alir oleh interaksi elastis dengan dislokasi yang melewati bidang-bidang paralel. Secara umum mekanisme pengerasan runtuh belum dipahami secara baik. Kontribusi tegangan alir biasanya kecil.

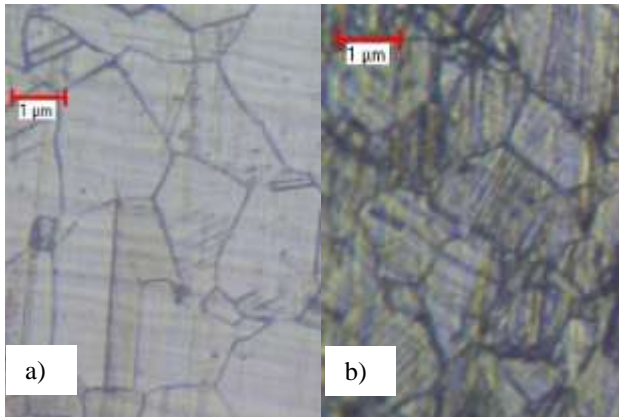
Gambar 5 menunjukkan struktur butiran AISI 316L setelah dideformasi. Struktur butiran pada daerah dekat lubang tidak jauh berbeda bentuknya dengan daerah yang jauh dari lubang. Butiran dengan ukuran besar mendominasi terhadap butiran ukuran kecil, yang mana hal ini juga ditunjukkan oleh AISI 316L sebelum dideformasi plastis (Gambar 6.a). Meskipun pada daerah dekat dengan permukaan bebas bentuk butiran tampak cenderung bulat dibandingkan dengan daerah yang lebih dalam yang memperlihatkan bentuk lebih memanjang, hal ini tidak menunjukkan adanya perubahan ukuran butiran secara jelas.



Gambar 5. Struktur mikro AISI 316L setelah dideformasi plastis

Dari penjelasan di atas didapati bahwa kerapatan dislokasi menentukan besaran kekerasan yang terjadi. Semakin rapat dislokasi terbentuk bahan menjadi semakin keras. Sayangnya sampai saat ini belum ditemukan metode sederhana yang dapat digunakan untuk memvisualisasikan bentuk-bentuk dislokasi. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan menggunakan mikroskop untuk mengidentifikasi keberadaan garis-garis dislokasi slip. Perbedaan struktur butir AISI 316L sebelum dan setelah dideformasi plastis ditunjukkan pada Gambar 6. Pada skala yang sama memperlihatkan ukuran butiran yang tidak berbeda jauh, namun dengan melihat secara teliti bagian dalam butiran tampak sekali perbedaannya. Pada AISI 316L setelah dideformasi (Gambar 6.b) menunjukkan garis-garis dislokasi slip

yang lebih banyak dan dengan kerapatan tinggi dari pada sebelum dideformasi (Gambar 6.a). Hal ini menjadi justifikasi bahwa kerapatan dislokasi yang menjadi penyebab utamaterhadap peningkatan kekerasan AISI 316L dari pada pengecilan ukuran butir.



Gambar 6. Struktur butiran AISI 316L a) sebelum dideformasi plastis b) setelah dideformasi plastis

Kesimpulan

Perlakuan deformasi plastis terhadap lubang baja AISI 316L telah meningkatkan kekerasannya hingga 200%. Semakin dekat dengan permukaan lubang semakin tinggi angka kekerasan yang terjadi. Pada daerah yang lebih dalam kekerasannya menurun secara linier. Peningkatan kekerasan AISI 316L lebih disebabkan oleh munculnya kerapatan dislokasi dari pada pengecilan ukuran butiran.

Referensi

- Arora, P. R. and Simha, K. R. Y., Analytical and experimental evaluation of cold working process for strain hardening materials, *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 53, No. 3, pp. 371-385 (1996)
- Brooks, C.R., Heat treatment of ferrous alloys, McGraw-Hill, USA (1979)
- Chen, X.H., Lu, J., Lu, L., Lu, K., Tensile properties of a nanocrystalline 316L austenitic stainless steel, *Scripta Materialia*, 52, pp. 1039-1044 (2005)
- Field, J.E., Walley, S.M., Proud, W.G., Goldrein, H.T., Siviour, C.R., Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies, *International Journal of Impact Engineering*, vol., 30, pp. 725-775 (2004)
- Fujiwara, H., Ameyama, K., Nano-Grain Formation in a Fully Ferritic SUS316L Austenitic Stainless Steel Produced by HS-PM Process, *Materials Science Forum*, 304-306, pp. 47-52 (1999)
- Lee W.S., and Yeh., G.W., The plastic deformation behaviour of AISI 4340 alloy steel subjected to high temperature and high strain rate loading conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 71, pp.

224-234 (1997)

Liu, G., Lu, J., Lu, K., Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening, *Materials Science and Engineering A286*, Pp. 91-95 (2000)

Lu, K., Lu, J., Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment, *Mater SciEng A*;Pp. 375-377:38 (2004).

Maximov J.T., Duncheva G.V., Kuzmanov, Modelling of hardening behaviour of cold expanded holes in medium-carbon steel, *Journal of Constructional Steel research*, vol. 64., pp. 161-167 (2008)

Pavier, M.J., Poussard, C.G.C., Smith, D.J., Effect of residual stress around cold worked holes on fracture under superimposed mechanical load, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 63, pp. 751-773 (1999)

Pelletier, H., Muller, D., Mille, P., Cornet, A., Grob, J.J., Doseffect on mechanical properties of high-energy nitrogen implanted 316L stainless steel, *Surface and Coating Technology*, 151, pp. 377-382 (2002)

Rawers, J., Crogdon, F., Krabbe, R., Duttlinger, N., Tensile characteristics of nitrogen enhanced powder injection moulded 316 L stainless steel, *Powder Metallurgy*, 39, pp.125-129 (1996)

Roland, T., Retraint, D., Lu, K., Lu, J., Enhanced mechanical behavior of a nanocrystallised stainless steel and its thermal stability, *Materials Science and Engineering A*, 445-446, pp. 281-288 (2007)

Roland, T., Retraint, D., Lu, K., Lu, J., Fatigue life improvement through surface nanostructuring of stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment, *Scripta Materialia*, 54, pp. 949-1954 (2006)

Ucok, I., Ando, T., Grant, N.J., *Materials Science Engineering A133* (1991)

Valiev, R.Z. dan Langdon, T.G., "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement", *Progress in Material Science*, 51, pp. 881- 981 (2006)