

EFEK ROL PANAS PADA SIFAT MEKANIK PLAT BAJA 15%Cr-25%Ni BAHAN STRUKTUR REAKTOR

Parikin, T.H. Priyanto, A.H. Ismoyo dan M. Dani

Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang Selatan

E-mail: farihin@batan.go.id

Diterima: 03 Agustus 2015

Diperbaiki: 1 September 2015

Disetujui: 28 September 2015

ABSTRAK

EFEK ROL PANAS PADA SIFAT MEKANIK PLAT BAJA 15%Cr-25%Ni BAHAN STRUKTUR REAKTOR. Pengukuran pengaruh proses pengerolan panas pada sifat mekanik plat baja 15%Cr-25%Ni untuk menentukan mampu bentuk (*formability*) bahan, telah dilakukan. Spesimen bahan plat dibentuk balok berdimensi 50x20x7 mm³ untuk memudahkan pengambilan data pengukuran. Hasil memperlihatkan bahwa: pengerolan panas mampu mendeformasi ukuran butiran baja 15%Cr-25%Ni menjadi lebih kecil; mula-mula bulat sebesar 6 µm dan setelah direduksi 70% menjadi panjang sebesar 4 µm (arah longitudinal) dan pipih sebesar 3 µm (arah transversal). Kekerasan baja 15%Cr-25%Ni meningkat hingga 27% dari nilai mula-mula sekitar 100,02 HVN untuk bahan non rol panas menjadi sekitar 126,86 HVN untuk bahan yang direduksi rol panas 70%. Peningkatan kekerasan ini didominasi oleh fenomena *strain hardening* dan penghalusan butir (bukan inklusi krom karbida Cr_xC_y). Peningkatan kekerasan ditandai oleh angka HVN yang membesar, yang diakibatkan oleh penyusutan volume kristal sebesar 0,35%. Penyusutan ini teridentifikasi dari pergeseran puncak bidang difraksi (311) dan (222) pada sudut difraksi berturut-turut sekitar θ=91° dan 96° yang mengakibatkan parameter kisi mengecil. Berbeda dengan pengerolan dingin yang dilakukan di bawah temperatur rekristalisasi bahan, transformasi fasa akibat deformasi tidak terjadi pada pengerolan panas baja 15%Cr-25%Ni ini seluruhnya memiliki struktur kristal kubus pusat muka (*fcc*) dengan grup ruang *Fm3m* (I-225) dan parameter kisi *a* = 3,58 Å. Akibat pengerolan terjadi orientasi kristalit yang kuat dalam komponen tekstur Brass {110} <112> dengan pelebaran dalam komponen Goss {011} <100> dimana sebelum pengerolan kristalit terorientasi secara dominan dalam komponen kubik {001} <100>.

Kata kunci: Baja 15%Cr-25%Ni, Rol panas, Sifat mekanik, Difraksi sinar-X, Neutron.

ABSTRACT

HOT-ROLLING EFFECTS ON MECHANICAL PROPERTIES OF 15%Cr-25%Ni STEEL PLATES FOR REACTOR STRUCTURE MATERIALS. The measurements of hot rolling effects on the mechanical properties of 15%Cr-25%Ni steel plates have been carried out to determine the formability of the materials. The specimens were prepared in the dimension of 50x20x7 mm³ to facilitate obtaining the measurement data. The results show that hot rolling was able to deform the grain size of 15%Cr-25%Ni steel plates to a smaller size, from 6 µm round into 4 µm (longitudinal) and 3 µm (transversal) lengthening bands after hot-roll reduction of 70%. The hardness of 15%Cr-25%Ni steel plates increased by 27%, from 100.02 HVN before hot rolling to 126.86 HVN after hot-rolling reduction of 70%. The improvement in hardness is predominantly caused by strain hardening and grain refinements, instead of by Cr_xC_y inclusion effects. The hardness increase was probably caused by crystal volume shrinkage of 0.35%, i.e. the rolled lattice parameter was smaller than unrolled specimen (initial). The shrinkage is identifiable from the shifted diffraction peaks of (311) and (222) around diffraction angles of 2θ=91° dan 96° respectively. In cold rolling which was, unlike hot rolling, carried out below the recrystallization temperature, there was no phase transformation due to hot rolling process. All of the 15%Cr-25%Ni steel was a face centered cubic (*fcc*) with space group of *Fm3m* and the lattice parameter *a*= 3.58 Å. Hot rolling effects caused strong crystal orientation in {110}<112> texture Brass components with broadening in {011}<100> texture Goss components, while prior to the rolling the dominant orientation was the {001}<100> cubic component.

Keywords: 15Cr-25%Ni steel, Hot rolling, Mechanical properties, X-ray, Neutron diffraction.

PENDAHULUAN

Pengembangan bahan struktur daya dan dukung untuk reaktor BATAN, dituangkan dalam kebijakan *landmark*, yang terbagi dalam dua zona litbang yaitu: zona primer; *cladding materials* berupa paduan ZrNbMoGe [1] dan zona sekunder-tertier; *high temperature materials* berupa baja *chrom* tinggi [2] yang dirintis sejak tahun 2006 oleh kelompok bahan reaktor nuklir di Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju. Dilatarbelakangi kebutuhan baja yang memiliki keunggulan khusus untuk bahan struktur operasi temperatur tinggi [3] dengan kandungan lokal yang signifikan mendorong para perekayasa material di BATAN mensintesa baja secara mandiri. Fabrikasi skala laboratorium telah dilakukan dengan menggunakan metode *casting*, dengan membuat serial baja austenitik (A) dan feritik (F) non standar. Baja serial A dan F non standar ini merupakan baja *low carbon* yang diramu dari bahan lokal. Sampai saat ini telah dibuat dua buah serial baja Austenitik (A1&A2) dan baja Feritik (F1&F2).

Baja tahan karat austenitik merupakan bahan non magnetik yang banyak digunakan di industri, karena memiliki sifat tahan korosi, plastik dan mekanik yang baik. Tipe baja ini banyak diproduksi dan diterapkan pada struktur konstruksi gedung, seperti reaktor nuklir pembangkit listrik. Sifat mampu bentuk (*formability*) salah satu yang sangat penting dalam produk baja, karena kebutuhan akan variasi bentuk aplikasi dan pemasangan yang mudah. Disamping itu beberapa usaha dilakukan untuk memperingan bagian-bagian tertentu dan untuk mengurangi biaya produksi. Demikian juga dalam industri komponen konstruksi baja, kegiatan riset diarahkan untuk mengintegrasikan dan meminimalkan bagian-bagian tertentu sehingga memperpendek proses manufaktur batangan baja dengan *hot-forging* menjadi lembaran/plat baja dengan *cold-forming* [4]. Dalam beberapa tahun terakhir, kemajuan pesat telah dicapai dalam teknologi pengerjaan dingin (*cold working*), salah satunya peralatan yang mampu secara praktis membentuk lembaran/plat logam dengan penebalan lokal, yang disebut lembaran/plat logam tempa [5].

Sejumlah proses mulai dari pembentukan *via* mekanisasi (*machining*) hingga perlakuan panas dilakukan dalam pembuatan bahan logam. Salah satu proses destruktif pada manufaktur logam berupa pengerolan yang mampu mengubah struktur dan sifat bahan. Pengerolan/pencanaian merupakan proses reduksi atau pengurangan luas penampang/ketebalan melalui deformasi. Proses ini dilakukan dengan cara melewati benda kerja pada satu pasang silinder rol berputar yang berlawanan arah. Baja plat merupakan salah satu hasil proses pengerolan. Proses ini dapat dilakukan pada temperatur kamar (*cold forming*; di bawah temperatur rekristalisasi) atau di atas temperatur rekristalisasi bahan (*hot forming*). Terdapat tiga

fenomena penting dalam proses mekanisasi ini; yaitu: (i) pengerasan bahan, (ii) transformasi fasa γ (FCC) menjadi fasa α (BCT) [6], dan (iii) perubahan orientasi kristal yang dikenal dengan *texturing*. Fenomena ini sangat diperlukan untuk mengetahui performa kekuatan bahan struktur.

Selain struktur mikro-kristal dan sifat kekerasan, karakterisasi baja 15%Cr-25%Ni non standar ini masih belum banyak dilakukan orang. Termasuk sifat tekstur yang dapat menaikkan performa keandalan bahan teknik. Sifat tekstur sangat dipengaruhi oleh arah orientasi kristal dalam bahan. Sifat ini mampu mengubah kekuatan mekanik pada suatu arah tertentu. Efek tekstur banyak dibutuhkan pada baja teknik untuk keperluan khusus; misalnya tali baja penarik jembatan gantung antar tempat, tali *crane*, tali kereta gantung, tali *lift* dan lain-lain. Penelitian tekstur pada serial baja A&F non standar ini baru dilakukan pada tahun 2011 oleh Azis dkk. [7] yang melaporkan hasil identifikasi sifat tekstur baja non standar F1 dan disusul pada tahun 2014, Priyanto dkk. [8] melaporkan hasil identifikasi sifat tekstur baja A2 non standar yang diperlakukan rol panas dengan memanfaatkan plot ODF-MAUD.

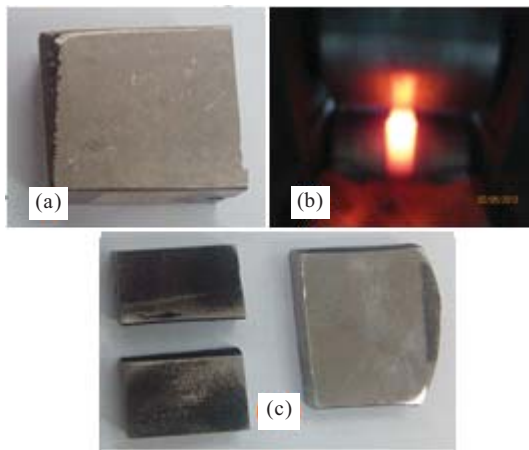
Pada makalah ini pemaparan dibatasi pada sifat mampu bentuk (*formability*) baja austenitik tipe A2 dengan kandungan 15%Cr dan 25%Ni, yang dirol panas hingga 70% reduksi ketebalan. Sifat *formability* ini sangat penting dimiliki oleh bahan konstruksi seperti baja yang sudah terstandarisasi (JIS, BSI, AISI, ASTM dll.). Hipotesis penelitian ini adalah setelah proses pengerolan panas dapat terjadi perubahan strukturmikro, kekerasan dan arah orientasi kristal (*texture*). Apa dan bagaimana pengaruh proses mekanisasi pengerolan panas terhadap material baja untuk bahan struktur reaktor, khususnya terkait sifat mampu bentuk (*formability*) bahan, dijelaskan dan dilaporkan. Beberapa sifat karakteristik plat baja ini telah diukur antara lain densitas [2], kekerasan [3], pola tekstur [8], struktur mikro [9] dan struktur kristal [10]. Sifat tersebut merupakan beberapa sifat dasar yang mencerminkan karakteristik unggul sebuah bahan struktur. Baja ini bila sudah berhasil dikarakterisasi dengan baik diharapkan dapat diterapkan sebagai kandidat bahan struktur/konstruksi reaktor nuklir pada zona tertentu.

METODE PERCOBAAN

Bahan, Alat dan Tata Kerja

Baja tipe A2 non standar ini merupakan baja *low carbon* ramuan mandiri, yang dibuat dengan teknik *casting* di Pusat Penelitian Telimek LIPI Bandung. Proses formulasi dan peleburan baja dilakukan dengan cara memadu unsur kandungan lokal (*scrap & nikelin*) Indonesia hingga 99,99%. Kandungan komposisi baja

yang diukur dengan *Optical Emission Spectrometry (OES)* di Politeknik Manufaktur Bandung adalah: 57,74% Fe, 15,42% Cr, 25,01% Ni, 0,32% Mn, 0,96% Si, 0,34% C dan di bawah 0,10% kandungan pengotor (*impurities*) Ti, S, P, V, Cu dan Nb [3]. Selanjutnya baja tipe A2 ini disebut baja 15%Cr-25%Ni. Dalam kegiatan ini telah disiapkan sebuah spesimen baja 15%Cr-25%Ni. Pengerolan spesimen dilakukan di Pusat Penelitian Metalurgi LIPI Serpong pada temperatur sekitar 1100 °C dengan reduksi 0,1 mm per *pass* dari ketebalan tertentu hingga ketebalan setelah rol panas lebih kurang mencapai ketebalan 7 mm. Spesifikasi ini sesuai dengan deformasi antara sekitar 70% reduksi ketebalan bahan. Hasil pengerolan panas di-*quench* ke dalam air, agar pemulihan bahan dapat dihambat dan memunculkan sifat tekstur rol.



Gambar 1. Spesimen baja tipe A2 ; (a). ingot/non rol, (b). mesin rol panas dan (c). hasil potongan spesimen reduksi 70%.

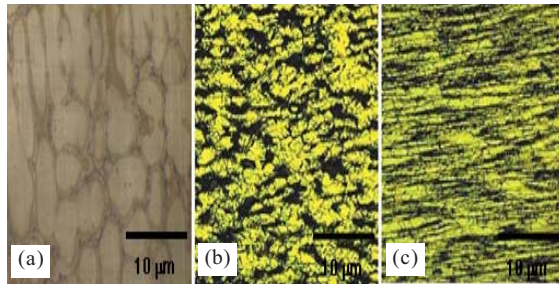
Bahan plat dibentuk balok berdimensi 50 x 20 x 7 mm³ untuk memudahkan penempatan spesimen di atas meja uji. Spesimen uji yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Karakterisasi spesimen hasil pengerolan ini, dilengkapi pengukuran kekerasan Vickers (*Mikrohardness Tester*) dan pengamatan strukturmikro (*Optical Microscope*) yang dibandingkan dengan kondisi spesimen awal (*as cast*). Pengukuran pola difraksi sinar-X (*Shimadzu XD-610*) pada spesimen dilakukan untuk mengetahui fenomena transformasi fasa dan *stress hardening* pada bahan sebagai efek proses pengerolan panas. Pengukuran pola difraksi dilakukan dengan difraktometer menggunakan Cu-*target*, lebar langkah pencacahan 0,05° dan jangkauan sudut pengukuran 2 θ =40°-100°, dengan *mode step counting* dan *preset time* 1 detik. Fenomena orientasi kristal (*texture*) pada cuplikan akibat pengerolan panas diamati dengan teknik difraksi neutron menggunakan difraktometer DN2, kristal monokromator Si (311), panjang gelombang, $\lambda = 1,2799 \text{ \AA}$ yang ada di Bidang Teknologi Berkas Neutron, PSTBM-BATAN.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Strukturmikro

Gambar 2(a)-(c) memperlihatkan struktur mikro permukaan spesimen baja *casting* (ingot) dan reduksi 70 % arah *longitudinal-transversal*, dengan pembesaran foto 100 kali menggunakan Mikroskop Optik. Distribusi struktur mikro terlihat tidak homogen (pada Gambar 2(a)) antara fasa austenit sebagai matriks dengan fasa kedua yang tersebar di batas butir yang terlihat agak gelap. Fasa kedua ini masih sedikit dan merupakan inklusi karbida (karbida; Cr_xC_y). Inklusi ini dikemukakan dalam hasil penelitian yang dilaporkan oleh N. Effendi [2]. Butir fasa austenit terlihat besar-besar dan menggambarkan sebuah struktur yang tidak terdeformasi, dengan ukuran butir rata-rata 6 μm . Gambar 2(b) memperlihatkan efek pengerolan panas 70% reduksi ketebalan pada struktur mikro permukaan bahan searah dengan perlakuan rol (*longitudinal*). Butir kecil austenit dan inklusi karbida terlihat jelas yang mengindikasikan terpecah-pecahnya struktur awal selama proses pengerolan. Pita-pita deformasi *longitudinal* teramati sepanjang arah rol yang memperlihatkan rekristalisasi tak lengkap. Besar deformasi (pengerolan) saat rekristalisasi berlangsung pada temperatur rol tertentu, tidak mampu menghilangkan atau melebur seluruh pita deformasi. Struktur inklusi karbida masih tersisa di sekitar batas butir, dan terpecah-pecah membentuk inklusi baru yang tersebar di sepanjang arah pengerolan. Fenomena ini mengimplikasikan bahwa pembentukan inklusi tidak dapat dihindarkan dengan proses deformasi dan rekristalisasi. Efektifitas proses rol membentuk butir sebesar 4 μm terjadi sepanjang alur pengerolan.

Inklusi karbida; Cr_xC_y masih sedikit terlihat pada Gambar 2(c), yang merupakan struktur mikro permukaan baja arah tegak lurus pengerolan (*transversal*). Inklusi ini tidak teramati jelas pada bahan ingot *as cast* (*virgin*). Pengaruh temperatur tinggi menyebabkan inklusi karbida banyak terbentuk, dan terpecah-pecah di sepanjang arah pengerolan. Pembentukan inklusi karbida ini boleh jadi akibat persentase Cr sangat tinggi. Gambar 2(c) sebagian memperlihatkan penyebaran pembentukan fasa intermediet (Cr_xC_y) pada spesimen dalam batas butir fasa austenit. Pita deformasi *transversal* terlihat lebih memipih sempit dan memanjang akibat proses rol panas. Besar ukuran rata-rata butir yang teramati adalah sekitar 3 μm . Pembentukan karbida ini sangat mengganggu sifat kekuatan bahan karena dapat meningkatkan kekerasan dan sekaligus merapuhkan. Inklusi lain juga bisa terbentuk akibat berlebihnya unsur lain dalam komposisi baja, dimana unsur terlarut padat (*solid solution*) mencapai titik jenuh. Butir kecil inklusi karbida teramati jelas pada gambar tersebut dan boleh jadi merupakan titik awal kerapuhan bahan. Oleh karena itu, perhitungan



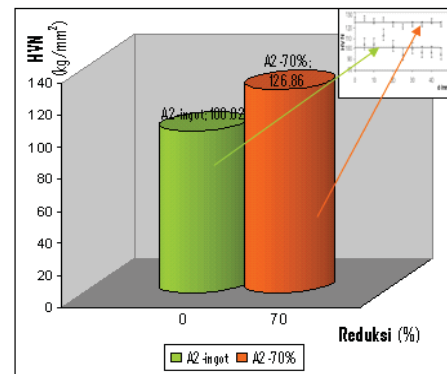
Gambar 2. Struktur mikro permukaan spesimen uji; pembesaran 100 kali; (a). ingot *as cast*, (b). rol panas 70% reduksi ketebalan arah longitudinal (searah rol), (c). rol panas 70% reduksi ketebalan arah transversal (tegak lurus rol).

dan pematuan unsur-unsur harus dilakukan secara teliti karena sangat mempengaruhi sifat dan kekuatan bahan baja yang dihasilkan.

Perbandingan strukturmikro baja *mild steel* dengan komposisi: C(0.3081), Si(0.3699), S(0.0929), Ni(0.0973), Mn(0.9635) Cr(0.1531), Cu(0.2706), Sn(0.0165), Pb(0.00061) dan Fe(97.64), yang dilaporkan dan dijelaskan oleh Ekpan dkk. [9]; terhadap baja yang diteliti diantaranya adalah keduanya memiliki struktur cor yang mirip yakni memperlihatkan ketidak-seragaman distribusi ferit (terang) dan perlit (gelap), dengan struktur ferit yang tersebar di beberapa daerah. Butiran tampak besar-besar yang menggambarkan bahwa strukturmikro belum terdeformasi (tidak cacat / masih utuh) dengan ukuran ASTM sekitar rata-rata 5,5 µm. Setelah dideformasi plastis struktur ferit dan perlit berubah dari struktur awal menjadi butiran halus. Pita deformasi teramati sepanjang arah rol saat peristiwa rekristalisasi berlangsung. Hal ini menunjukkan bahwa besar deformasi pada temperatur rekristalisasi sesaat, tidak dapat menghilangkan terjadinya batas pemisah atau pita deformasi. Butiran halus yang diamati pada tahap ini dengan ukuran ASTM butir rata-rata 6,5 µm. Struktur ferit pada produk akhir tidak banyak berbeda dalam ukuran butir, yang terjebak di batas butir matriks austenit. Ukuran butir teramati rata-rata sekitar 7 µm.

Kekerasan

Gambar 3 memperlihatkan grafik peningkatan kekerasan bahan setelah proses rol panas dengan reduksi sebesar 70%. Mula-mula kekerasan bahan baja ingot *as cast* sebesar 100,02 HVN. Sesudah dirol panas dengan reduksi sebesar 70%, kekerasan menjadi 126,86 HVN. Pengukuran kekerasan bahan ini meningkat sepanjang plat dengan pertambahan sekitar 27% dari kekerasan bahan baja ingot *as cast*. Peningkatan ini boleh jadi disebabkan oleh distribusi inklusi Cr_xC_y (krom karbida), penghalusan butir dan pengerasan regangan (*strain hardening*) dalam bahan. Pengerasan akibat inklusi ini bukan satu-satunya penyebab utama dari peningkatan kekerasan bahan ini, tetapi proses pengerasan regangan dan penghalusan butir juga



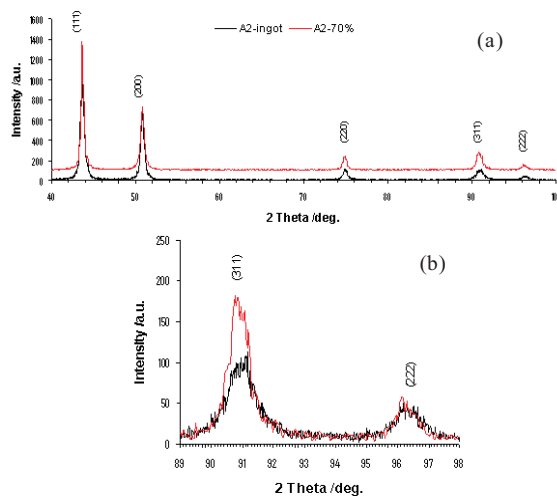
Gambar 3. Kekerasan rata-rata spesimen baja 15%Cr-25%Ni ingot *as cast* dan rol panas 70% reduksi ketebalan. Inset hasil pengukuran indenter sepanjang ±50 mm dimensi spesimen.

merupakan faktor yang berkontribusi pada peningkatan nilai kekerasan bahan ini.

Pergeseran puncak bidang difraksi dapat menunjukkan besar pengaruh *strain hardening* melalui pengukuran dan pengamatan pola difraksi bahan. Kombinasi ukuran butir yang kecil, fasa kedua yang terdistribusi merata dan kehomogenan yang serbasama, dapat berkontribusi pada sifat kekuatan bahan yang tinggi [9,11-14]. Fakta ini yang hendak dicapai pada fabrikasi bahan struktur baja 15%Cr-25%Ni non standar, agar cukup *reliable* sebagai bahan pendukung struktur reaktor. Persyaratan umum bahan pendukung struktur reaktor adalah tahan beban mekanik, tahan temperatur tinggi, tahan korosi dan tahan iradiasi. Kombinasi parameter tersebut di atas selalu digunakan sebagai acuan untuk meyakinkan bahwa suatu produk akhir boleh diterapkan pada struktur konstruksi bangunan reaktor, khususnya daerah (zona) sekunder-tertier.

Struktur Kristal

Gambar 4 memperlihatkan pola difraksi sinar-X spesimen baja 15%Cr-25%Ni sebelum dan sesudah dirol panas. Lima buah bidang refleksi karakteristik baja teramati cukup jelas, yakni: (111), (200), (220), (311) dan (222). Meskipun pola difraksi bahan ini berkontribusi oleh efek fluoresensi sinar-X (*2nd level X-ray; K_β*) terhadap unsur besi (Fe), yang terlihat pada data *background* berupa garis yang tebal atau lebar (tidak *smooth*). Tetapi *peak to background ratio* cukup memadai dan masih dapat dibedakan antara puncak difraksi dan cacah latar. Efek ini tidak terjadi pada kasus difraksi neutron, karena memiliki daya penetrasi yang kuat. *Full profile* difraksi bahan ini mengindikasikan tidak terjadi transformasi fasa pada proses pengerolan panas (di atas temperatur rekristalisasi). Gambar 4(a) memperlihatkan pola difraksi bahan sebelum dan sesudah proses mekanisasi rol panas. Baja 15%Cr-25%Ni ini seluruhnya memiliki struktur kristal *face centered cubic (fcc)* dengan grup ruang *Fm3m* (1-225) dan parameter kisi $a = 3,58 \text{ \AA}$.



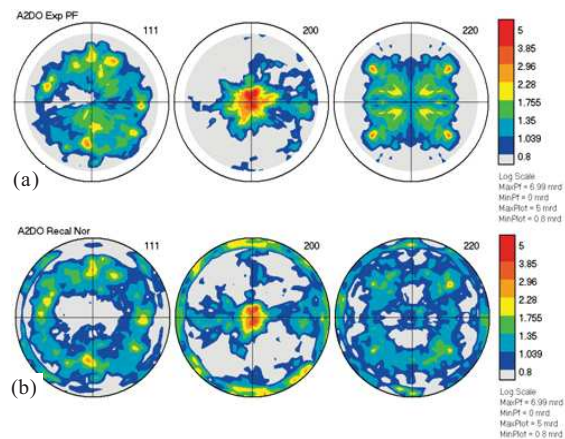
Gambar 4. Pola difraksi spesimen baja 15%Cr-25%Ni; (a). full profile dan (b). pergeseran puncak bidang (311) dan (222) pada ingot *as cast* dan rol panas 70% reduksi ketebalan.

Hal ini sangat berbeda pada kasus pengerolan dingin temperatur kamar (di bawah temperatur rekristalisasi bahan) pada baja austenitik SS-304, seperti yang telah dilaporkan oleh Parikin dkk. [6]. Pengerolan dingin temperatur kamar dapat menyebabkan transformasi fasa austenit (fasa γ ; FCC) menjadi fasa martensit (fasa α ; BCT). Pengerolan dingin mampu memecahkan bidang refleksi (220) dari fasa austenit menjadi *splitting plane* berupa *martensite doublet* yakni: dua buah bidang refleksi, yaitu: (200) dan (211) dalam fasa martensit. Kedua bidang martensit ini dapat tumbuh sebanding dengan bertambahnya persen reduksi pengerolan. Oleh karena tidak ada bukti bidang refleksi fasa martensit dalam kedua pola difraksi sinar-X dalam Gambar 4(a), maka spesimen baja ingot dan rol panas reduksi 70%, dianggap seluruhnya berstruktur kristal austenit (γ -Fe). Gambar 4(b) memperlihatkan pergeseran puncak bidang (311) dan (222) yang terjadi dalam bahan baja ingot *as cast* dan rol panas reduksi 70%, berturutan pada sekitar sudut $2\theta = 91$ derajat dan $2\theta = 96$ derajat. Sebelum dilakukan pengerolan bidang refleksi (311) dan (222) berada berturutan pada sekitar sudut $2\theta = 91,15$ derajat dan $2\theta = 96,50$ derajat. Setelah dilakukan pengerolan panas sebesar 70% reduksi ketebalan, bidang refleksi bergeser berturutan pada sekitar sudut $2\theta = 90,75$ derajat dan $2\theta = 96,10$ derajat. Selisih keduanya berkisar antara $\Delta 2\theta = 0,4$ derajat ($\sim 0,007$ radian). Pergeseran ini yang mengindikasikan adanya peregangan kisi dalam bahan, yang mengakibatkan bertambahnya angka kekerasan bahan (*strain hardening*). Besar peregangan bidang kristal ini dapat dihitung dengan perumusan $\Delta 2\theta = -2\varepsilon \tan \theta$ [15]. Perhitungan sederhana peregangan kisi pada bidang (311) dan (222) dapat dilakukan. Bila angka-angka dimasukkan dalam perumusan tersebut didapat nilai peregangan kisi kristal sebesar $-0,0035$. Angka negatif ini mengisyaratkan bahwa kristal bahan terkompresi (*compressive strain*) sebesar 0,35%. Dengan

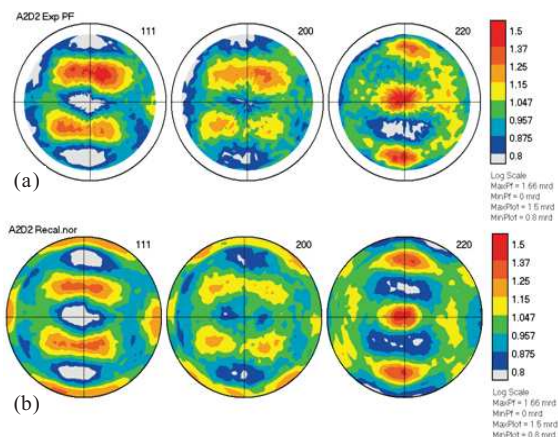
kata lain reduksi 70% menyebabkan volume kristal fasa austenit dalam bahan mengalami penyusutan (*shrinkage*) sebesar 0,35% akibat proses pengerolan panas. Penyusutan volume ini mengakibatkan peningkatan kekerasan bahan sebesar 27% seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.

Pole Figure

Sifat mampu bentuk (*formability*) juga dapat diidentifikasi dari banyaknya jumlah bidang *slip* yang dimiliki oleh suatu bahan polikristal. Bidang *slip* ini sangat bergantung pada orientasi kristal yang memiliki jumlah atom per satuan volume paling banyak, misalnya bidang (111) untuk sistem kristal *fcc*. Salah satu pengukuran orientasi kristal (tekstur) dalam bahan adalah dengan menggunakan teknik difraksi (sinar-X & neutron) untuk mendapatkan pola gambar kutub (*pole figure*). Pengolahan data tekstur hasil pengukuran difraksi umumnya dilakukan dengan *software* khusus yang dapat menampilkan pola warna-warna yang berbeda, seperti program ODF-MAUD yang dibuat oleh Lutterotti [8].



Gambar 5. Pole figure (gambar kutub) ingot *as cast* spesimen baja 15%Cr-25%Ni (a). incomplete pole figure dan (b). rekalkulasi normalisasi pole figure [16].



Gambar 6. Pole figure (gambar kutub) rol panas 70% reduksi ketebalan spesimen baja 15%Cr-25%Ni (a). incomplete pole figure dan (b). rekalkulasi normalisasi pole figure [8].

Pole figure bahan *as cast* dan setelah pengerolan 70% diukur dengan teknik difraksi neutron menggunakan difraktometer tekstur (DN2), seperti yang telah dilaporkan oleh T.H. Priyanto dkk. [8,16]. Dalam eksperimen *pole figure* cuplikan di-tilt dalam jangkauan sudut $0^\circ \leq \chi \leq 60^\circ$ dan dirotasi dengan jangkauan rotasi $0^\circ \leq \chi \leq 360^\circ$ sehingga diperoleh *pole figure* tak lengkap (*incomplete pole figure*) seperti ditunjukkan pada Gambar 5(a) dan Gambar 6(a). Melalui proses perhitungan ulang normalisasi (*normalized recalculation*) didapatkan pola *pole figure* dalam jangkauan maksimum ($\chi=90^\circ$). Gambar 5 dan Gambar 6 menampilkan pola gambar kutub *normalized recalculation* spesimen baja 15%Cr-25%Ni sebelum dan sesudah di rol panas dengan reduksi 70%. Dari *pole figure* tersebut diperoleh hasil sebagian besar kristalit terorientasi dalam arah $\langle 001 \rangle$ dalam komponen tekstur kubik $\{100\} \langle 001 \rangle$ dan akibat proses pengerolan komponen kubik $\{100\} \langle 001 \rangle$ menjadi berkurang dan terjadi perubahan orientasi kristalit menjadi komponen Brass $\{110\} \langle 112 \rangle$ dengan pelebaran yang mengarah pada komponen Goss $\{110\} \langle 001 \rangle$ [14]. Pembahasan sifat tekstur pada baja 15%Cr-25%Ni (tipe A2 non standar) ini dikupas lebih mendalam pada literatur [8] dan [16].

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengerolan panas mampu mendeformasi ukuran butiran baja 15%Cr-25%Ni menjadi lebih kecil. Hasil pengamatan struktur mikro mendapatkan ukuran butiran baja ingot/non rol panas mula-mula bulat sebesar 6 μm dan setelah direduksi 70% menjadi panjang sebesar 4 μm (arah *longitudinal*) dan pipih sebesar 3 μm (arah *transversal*). Kekerasan baja 15%Cr-25%Ni meningkat hingga 27 % dari mula-mula sekitar 100,02 HVN untuk bahan non rol panas menjadi sekitar 126,86 HVN untuk bahan yang direduksi rol panas 70%. Peningkatan kekerasan ini diikuti dengan penyusutan volume kristal sebesar 0,35%, yang dapat diidentifikasi berturutan dari pergeseran bidang difraksi (311) dan (222) pada sekitar sudut hambur $2\theta=91^\circ$ dan 96° . Ditinjau dari tekstur bahan sebelum dan sesudah pengerolan menunjukkan bahwa sebelum proses pengerolan (*as cast*) kristalit terorientasi dalam komponen tekstur kubik $\{001\} \langle 100 \rangle$ dan setelah 70% pengerolan panas, kristalit mengarah dalam komponen tekstur Brass $\{110\} \langle 112 \rangle$ dengan pelebaran dalam komponen Goss $\{011\} \langle 100 \rangle$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Drs. Nurdin Effendi, M.Sc. atas saran diskusi yang bermanfaat. Drs. Bambang Sugeng M.T. dan Imam Wahyono, S.ST. yang telah ikut andil dalam penelitian ini sebagai penanggung jawab dan operator difraktometer sinar-X

di PSTBM-BATAN. Penelitian ini didanai oleh program DIPA tahun 2014 dalam pengembangan baja FeCrNi untuk bahan struktur reaktor tahan temperatur tinggi.

DAFTAR ACUAN

- [1]. B.Bandriyana, A.K. Rivai, A.H. Ismoyo dan Parikin. "Penelitian dan Pengembangan Paduan Zirkonium untuk Material Kelongsong PLTN." dalam Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir V, hal. 217-225, 2012.
- [2]. N. Effendi and A. K. Jahja. "Structural Characterization and Its Physical Properties of Non-Standard A1 Austenite Steel." *Int. Journal of Materials and Mechanical Engineering*, vol. 3, no.2, pp. 38-44, 2014.
- [3]. B.A. Pint, K.A. Terrani, M.P. Brady, T. Cheng and J.R. Keiser. "High Temperature Oxidation of Fuel Cladding Candidate Materials in Steam-Hydrogen Environments." *Journal of Nuclear Materials*, vol. 440, pp. 420-427, 2013.
- [4]. K. A. Cashell and N. R. Baddoo. "Ferritic Stainless Steel in Structural Applications." *Thin-Walled Structures*, vol. 83, pp. 169-181, 2014.
- [5]. T. Suzumura. "Trends in Sheet Forged Parts Manufacturing." *Jour. Jpn. Soc. Tech. Plasticity*, vol. 51, no. 594, pp. 633-637, 2011.
- [6]. Parikin, P.Killen and A. Raftery. "Measurements of Residual Stresses in Cold-Rolled 304 Stainless Steel Plates Using X-ray Diffraction with Rietveld Refinement Method." *Atom Indonesia*, vol. 35, no. 1, pp.19-36, 2009.
- [7]. A.K. Jahja, N. Effendi and M.R. Muslich. "Texture Measurement by Neutron Diffraction for A1 Non Standar Steel Bars." *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 13, no. 1, hal. 34-38, 2011.
- [8]. T. H. Priyanto, N. Effendi and Parikin. "Texture Analysis of the Hot Rolling Effect on Austenitic Cr-Ni Steel Obtained from Extracted Materials using Neutron Diffraction Method." *Advanced Materials Research*, vol.1123, pp. 104-108, 2015.
- [9]. E. I. Akpan and I. A. Haruna. "Structural Evolution and Properties of Hot Rolled Steel Alloys." *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, vol. 11, no. 4, pp.417-426, 2012.
- [10]. Parikin, T.H. Priyanto, A.H. Ismoyo, dkk. "Transformasi Struktur Kristal Fasa α - γ pada Serbuk Baja A2 Non Standar Bahan Struktur Reaktor." *Urania, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 20, no. 2, hal. 65-75, 2014.
- [11]. W. Ozgowicz and A. Kurc. "The Effect of the Cold Rolling on the Structure and Mechanical Properties in Austenitic Stainless Steels Type 18-8." *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 38, no.1, pp.26-33, 2009.
- [12]. A. K.Lisiecka and E. K. Ozgowicz. "Structure and Mechanical Properties of Austenitic Steel After

- Cold Rolling.” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 44, no. 2, pp.148-153, 2011.
- [13]. M. Milad, N. Zreiba, F. Elhalouanin and C. Baradai. “The Effect of Cold Work on Structure and Properties of AISI 304 Stainless Steel.” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 203, pp.80-85, 2008.
- [14]. A. K. Lisiecka, W. Ozgowicz, W. Ratuszek and K. Chrusciel. "Texture and Structure Evolution During Cold Rolling of Austenitic Stainless Steel.” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 52, no.1, pp. 22-30, 2012
- [15]. G. Mallailah, P. R. Reddy and A. Kumar. “Influence of Titanium Addition on Mechanical Properties, Residual Stresses and Corrosion Behaviour of AISI-430 Grade Ferritic Stainless Steel GTA Welds.” *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp.1740-1751, 2014.
- [16]. T. H. Priyanto, Parikin and M.J. Lie. “Texture Analysis Using Neutron Diffraction Method on Non Standardized Austenitic Steel Process by Machining, Annealing and Rolling.” *Makara Journal of Technology, University of Indonesia*, 2016. (submitted/under review).