

# PENGARUH PROSES Pengerolan Panas Pada Tegangan Sisa Bahan Struktur Baja A-2 Non Standar Dengan Teknik Difraksi Neutron

**Parikin, N. Effendi, H. Mugihardjo, A. H. Ismoyo**

Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju BATAN

Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang Selatan 15314

e-mail: farihin@batan.go.id

(Naskah diterima:18-12-2013, disetujui: 20-01-2014)

## ABSTRAK

**PENGARUH Pengerolan Panas Pada Tegangan Sisa Bahan Struktur Baja A-2 Non Standar Dengan Teknik Difraksi Neutron.** Pengukuran tegangan sisa bahan struktur baja A-2 non standar hasil perlakuan rol panas telah dilakukan di PTBIN- BATAN. Proses pengerolan komponen bahan struktur konstruksi sangat direkomendasikan karena dapat meningkatkan rasio kekuatan terhadap beban. Peningkatan kekuatan ini sangat dibutuhkan pada bangunan konstruksi yang memerlukan persyaratan khusus dengan faktor keselamatan sebagai prioritas utama. Empat buah spesimen disiapkan dalam kegiatan ini; satu sebagai bahan referensi yang tidak dirol (A2D0n), dan tiga buah spesimen lain (A2D2n, A2D3n dan A2D5n) diberi perlakuan rol panas dengan reduksi ketebalan berbeda, yakni: 71%, 81% dan 87%. Hasil memperlihatkan bahwa: pengerolan hingga reduksi 71% membangkitkan peregangan kisi sebesar 0,25% dan tegangan sisa tarik sebesar 9,7 MPa sedangkan peregangan kisi sebesar 0,27% dan tegangan sisa terbesar 10,2 MPa terjadi pada reduksi 81%. Selanjutnya peregangan kisi dan tegangan sisa meluruh kembali berturut-turut hingga 0,23% dan 8,3 MPa terjadi pada reduksi pengerolan panas sebesar 87%. Disimpulkan bahwa: peningkatan peregangan bahan baja A-2 non standar terjadi akibat pergeseran bidang-bidang kristal (*slip plane*) oleh mekanisme pengerolan, dimana mampu meningkatkan kekuatan mekanik bahan berupa pengerasan regangan (*strain hardening*), dan fenomena kecenderungan distribusi tegangan sisa bahan struktur A-2 non standar adalah tegangan tarik (*tensile stress*).

**Kata kunci :** baja FeCrNi, rol panas, tegangan sisa, difraksi neutron.

## ABSTRACT

**HOT ROLLING EFFECTS ON RESIDUAL STRESS OF STRUCTURAL MATERIALS OF AUSTENITIC A-2 NON STANDARD STEEL BY USING NEUTRON DIFFRACTION TECHNIQUE.** Measurement of hydrostatic residual stress distribution in hot rolled Austenitic steels (A-2) have been carried out. Rolling process of structural construction component materials is recommended because it offers better load ratio strength for the application of the materials as vital materials that need special requirements, where safety factor becomes the primary priority. Four specimens were prepared in this study, i.e. one specimen (unrolled) as a reference called A2D0n, three specimens are the rolled ones called A2D2n, A2D3n and A2D5n, with thickness

*reduction of 71%, 81% and 87% respectively. The measurement shows that the reduction of 71% in hot rolling generates lattice strain and hydrostatic residual stress of about 0.25% and 9.7 MPa respectively, while 0,27% strain and 10.2 MPa stress is resulted from 81 % reduction. The strain and stress revert back to 0.23% and 8.3 MPa after hot rolling at 87% reduction. It can be concluded that the rise of straining in A-2 non standard steel may be caused by the shifting of crystal plane due to rolling mechanism, which increases the mechanical strength by strain hardening of the material. The residual stress distribution in structural material of austenitic-2 is tensile stress.*

**Key words :** FeCrNi steel, hot rolling, residual stress, neutron diffraction.

## PENDAHULUAN

Indonesia telah lama bermaksud membangun reaktor daya (PLTN) guna mengurangi beban pemerintah di bidang energi khususnya energi listrik. Dalam usaha mendukung pembangunan reaktor tersebut dan sekaligus meningkatkan ketahanan nasional bidang industri strategis (material energi), maka perlu sebuah kegiatan penelitian di lingkungan Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju Badan Tenaga Nuklir Nasional (PSTBM-BATAN) yang menggagas sintesis bahan struktur reaktor yang memenuhi persyaratan khusus. Bahan struktur reaktor berkaitan dengan material yang mampu pada temperatur dan tekanan tinggi, karena pada umumnya reaktor nuklir beroperasi pada temperatur dan tekanan tinggi. Persyaratan khusus tersebut antara lain: tahan beban mekanik, tahan beban termal, tahan korosi suhu tinggi dan tahan iradiasi yang terpancar dalam reaktor.

Untuk memenuhi persyaratan sebagai bahan struktur reaktor sesuai dengan ASTM E185-5, material harus melalui proses pengerolan yang berbasis deformasi plastis. Dalam setiap tahapan pembentukan bahan tidak terlepas proses perlakuan baik termal maupun mekanik. Proses pengerolan panas/dingin merupakan salah satu proses perlakuan mekanik dan termal saat bahan dibentuk sesuai dengan kebutuhan dan kegunaannya.

Pemanfaatan proses pengerolan pada komponen bahan struktur konstruksi sangat diminati oleh karena rasio kekuatan terhadap beban, fabrikasi yang sederhana dan kemudahan dalam proses angkat-pasang dalam suatu pembangunan. Proses ini adalah sebuah deformasi yang dilakukan disekitar temperatur kristalisasi logam. Proses pengerolan logam sangat berperan penting dan tidak dapat dipisahkan dari alur proses produksi. Kebutuhan bentuk dan ketebalan yang berbeda dalam suatu konstruksi memberikan kenyamanan dan mempermudah pemasangan fungsi. Selama dilakukan proses fabrikasi, kemungkinan distribusi *strain energy* dalam bahan berubah, khususnya di dekat daerah permukaan. Energi peregangan (*strain energy*) dalam butiran bahan menjadi tidak homogen dan menimbulkan tegangan internal. Tegangan ini disebut tegangan sisa, yang didefinisikan sebagai tegangan yang kemungkinan muncul dalam benda *solid elastic* saat seluruh beban *external* dihilangkan<sup>[1]</sup>. Hasil penelitian pengaruh pengerolan dingin (temperatur ruang) terhadap bahan baja tipe SS-304 dilaporkan oleh Parikin<sup>[2]</sup> ; bahwa tegangan sisa dalam bahan terjadi akibat *mismatch* ekspansi termal antara fasa martensit dan austenit, yang masing-masing mengalami tegangan tekan dan tegangan tarik. Penambahan reduksi pengerolan mampu meningkatkan fraksi fasa martensit dan tegangan sisa tekan. Dalam literatur<sup>[2]</sup> ini dijelaskan pula

formulasi perhitungan regangan dan tegangan sisa secara kristalografi.

Pada pola difraksi, kejadian peregangan kisi dapat ditentukan dari besarnya angka pergeseran puncak suatu bidang refleksi. Fenomena dinamika peregangan kisi dapat ditelusuri dari lebar setengah maksimum puncak difraksi, yang diformulasikan melalui medan regangan. Regangan yang timbul dapat dievaluasi dari parameter kisi dan maksimum lebar setengah puncak, FWHM, menggunakan analisis garis pelebaran *shearer* [3] dan metode Rietveld [4]. Analisis ini dapat memberikan kuantitas tegangan sisa dalam bahan. Dalam metode Rietveld, penghalusan kuadrat terkecil dilakukan hingga *fitting* terbaik dicapai antara seluruh pola difraksi yang teramati dan seluruh pola intensitas penghitungan yang didasarkan pada model penghalusan simultan, efek difraksi optik, faktor instrumen dan karakteristik lain seperti parameter kisi, sesuai keinginan dan pemodelan. Kunci penyelesaiannya adalah *feedback* selama penghalusan, antara kemampuan pengetahuan struktur dan alokasi pengamatan intensitas terhadap refleksi Bragg individu yang saling tumpang tindih sebagian.

PSTBM BATAN telah mensintesis beberapa paduan FeCrNi dengan metode *cor foundry*, yang dinamai dengan tipe F1, F2, A1 dan A2 [5], yang dibedakan dalam komposisi dopan yang dicampurkan. Tipe ini didasarkan pada jenis feritik dan austenitik, yang masih dalam proses karakterisasi beberapa sifat unggul dan performa bahan

oleh Nurdin E dkk. [5]. Studi bertujuan untuk mengamati pengaruh rol panas yang dilakukan di atas temperatur rekristalisasi terhadap tegangan sisa bahan struktur baja FeCrNi (A-2 non standar) hasil peleburan mandiri. Pengukuran untuk pemeriksaan tegangan sisa ini sangat penting dalam rangka penerapan bahan vital yang memerlukan persyaratan khusus dimana umur pakai/kehandalan bahan dan keselamatan menjadi prioritas utama.

## TATA KERJA

Penelitian dan pengembangan bahan struktur ini dilakukan di Laboratorium Kawasan Puspiptek Serpong. Bahan baku besi *scrap* dan unsur dopan pemuatan diperoleh dari pasaran. Baja paduan FeCrNi (austenitik; A2) dengan komposisi seperti tersusun dalam Tabel 1, dibuat mandiri dengan teknik cor *foundry* di Pusat Penelitian Metalurgi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Hasil proses masining dan pembentukan spesimen terlihat pada Gambar 1. Untuk mendapatkan bahan *virgin* ( $d_0$ ), baja A-2 non standar dinormalisasi pada temperatur 700°C selama 3 jam, dengan laju kenaikan dan pendinginan sebesar 15,4 °C/menit. Setelah mencapai kondisi temperatur kamar bahan di-*running* dengan difraktometer neutron pada panjang gelombang 1,8195 Angstrom dan jangkauan pengukuran  $2\theta=10^\circ$  sampai dengan  $2\theta=160^\circ$  dan langkah pencacahan 0,05° menggunakan *mode step counting*.

Tabel 1. Komposisi (%wt.) unsur baja A-2 non standar

Fe	Cr	Ni	Mn	Si	C	Impuritas
57,74	15,42	25,01	0,32	0,96	0,34	Ti= 0,002 S=0,008 P=0,0163 V=0,039 Cu=0,051 Nb=0,0053

Dalam kegiatan ini telah disiapkan 4 buah spesimen baja struktur reaktor austenitik A2 seperti tersusun pada Tabel 2. Tiga (3) buah spesimen dilakukan eksperimen pengerolan panas berkondisi temperatur sekitar 1100 °C. Proses pengerolan panas dilakukan dengan reduksi 0,1 mm per *pass* dari ketebalan tertentu hingga ketebalan lebih kurang mencapai ketebalan plat pipa/vessel dalam reaktor (7 mm). Spesifikasi ini sesuai dengan deformasi antara 60% dan 90% reduksi ketebalan bahan. Hasil pengerolan panas di-*quench* dalam air, agar pemulihan bahan dapat dihambat dan memunculkan sifat tekstur rol. Sebagai kelengkapan data karakterisasi

spesimen hasil pengerolan ini, dilakukan pula pengukuran kekerasan Vickers dan pengamatan strukturmikro, kemudian dibandingkan dengan kondisi spesimen awal (*as cast*). Pengujian difraksi pada spesimen dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh nilai tegangan sisa bahan sebagai efek proses pengerolan panas.

Tabel 2. Spesimen baja struktur Austenitik A2

Spesimen	Reduksi ketebalan (%)	Keterangan
A2D0n	0	<i>referensi; d<sub>0</sub></i>
A2D2n	71	<i>d<sub>1</sub></i>
A2D3n	81	<i>d<sub>2</sub></i>
A2D5n	87	<i>d<sub>3</sub></i>



Gambar 1. Spesimen baja A2: (a) hasil cor *foundry*, (b) mesin rol, (c) prose rol panas dan (d) spesimen hasil rol panas.

Tabel 4. Parameter hasil *refinements* spesimen paduan A-2 non standar

Reduksi (%)	Parameter Kisi-a (Å)			
	A2D0n	A2D2n	A2D3n	A2D5n
0	3,5782 (5)	-	-	-
71	-	3,5873 (4)	-	-
81	-	-	3,5881 (4)	-
87	-	-	-	3,5860 (8)
Volum e (Å <sup>3</sup> )	45,81 (5)	46,16 (6)	46,19 (7)	46,11 (7)
<i>Reliability factor</i>				
<i>Rwp</i> (%)	13,94	13,66	15,40	13,7 5

Tabel 3 menyusun data krista-lografi awal struktur kristal A-2 yang digunakan dalam proses penghalusan. Dengan memasukkan parameter kristalografi yang sesuai, proses Rietveld *refinements* dilakukan secara simultan. Profil bentuk puncak fasa dimodelkan secara terpisah menggunakan fungsi *pseudo-Voigt*<sup>[7]</sup> yang merupakan kom-binasi linier fungsi Gaussian dan Lorentzian. Cakupan data eksperimen yang memadai membolehkan parameter struktur fasa dihaluskan seperti: parameter kisi, termal isotropis, simpangan titik nol, anisotropis (*preferred orientation*), dan profile. Penghalusan model fasa tunggal ini cukup valid untuk setiap spesimen, dengan *reliable factor*, *Rwp* berkisar antara 13%-15%; seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Kecocokan data pengamatan dan perhitungan (dinyatakan dengan nilai *Rwp*) membesar akibat efek fluoresensi bahan besi (baja) yang menyebabkan pola *background* melebar dan mempengaruhi statistika data yang kurang bagus. Penghalusan parameter kisi dan profil puncak untuk fasa austenitik ini sedikit bervariasi dari spesimen ke spesimen. Gambar 3 memperlihatkan pola penghalusan struktur dengan tampilan

reduksi yang mengindikasikan profil model sangat cocok dengan data eksperimen bagi seluruh spesimen tersebut. Gambar pola penghalusan Rietveld data struktur pada bahan A2D0n, A2D2n, A2D3n dan A2D5n ini dilakukan dengan sistem analisis struktur kristal umum; RIETAN94 yaitu sebuah *software* yang dikembangkan oleh F. Izumi [7]. Program ini yang mampu mengolah data difraksi yang diperoleh dengan sinar-X maupun neutron.

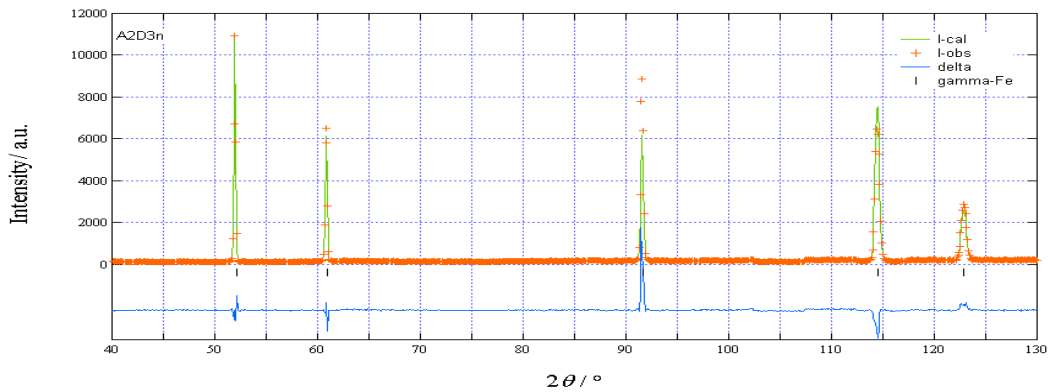
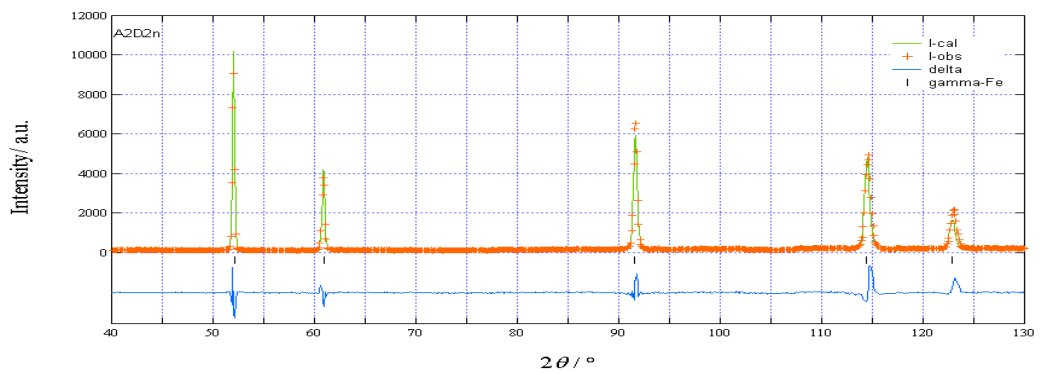
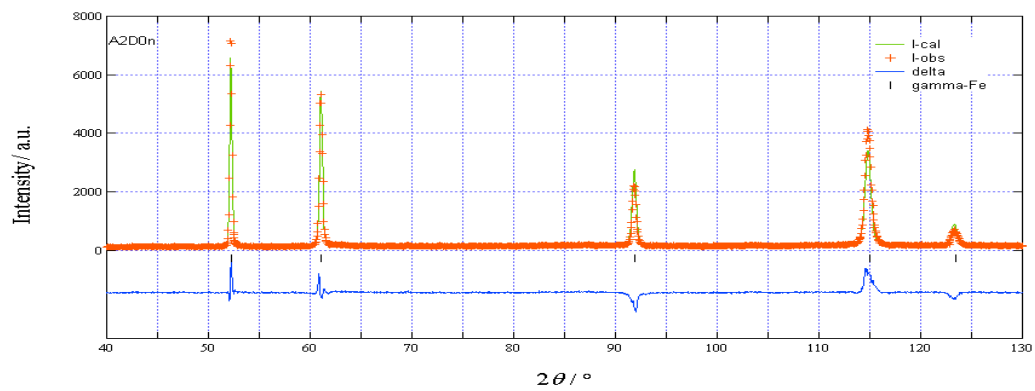
Pada Gambar 3 terdapat tanda + berwarna jingga yang membentuk kurva adalah pola baku hasil pengukuran alat difraktometer dan garis *smooth* kurva berwarna hijau merupakan pola model hasil perhitungan program RIETAN94. Sedangkan garis tegak kecil berwarna hitam di bawah kedua pola (baku dan model) merupakan tanda *line broadening*, yang mengindikasikan posisi puncak refleksi fasa austenit. Garis *smooth* kurva berwarna biru muda dibawah tanda *line broadening* merupakan pola selisih kecocokan (*residual; delta*) antara pengukuran dan perhitungan. Terlihat dengan jelas refleksi bidang (111), (200), (220), (311) dan (222) merupakan fasa kubik *fcc* yang mendominasi bahan paduan. Proses penghalusan dilakukan menggunakan fasa tunggal dengan grup ruang *Fm3m (I-225)*<sup>[8]</sup>.

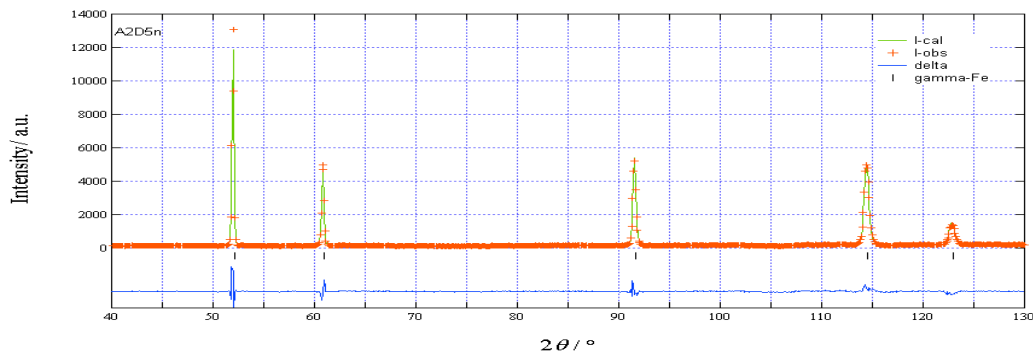
Hipotesis atau dugaan kuat terhadap pengaruh perlakuan pengerolan adalah peristiwa pembentukan *texture* pada bahan. Proses pengerolan dapat mengarahkan kristalisasi pada bahan ke suatu orientasi tertentu (*preferred orientation*) dari butir-butir logam yang acak. Tekstur ini umumnya digambarkan dengan *pole figure* yang menunjukkan orientasi yang dominan pada bidang kristal yang sejajar dengan permukaan pelat dan arah pengerolan. Peristiwa ini terlihat pada orientasi bidang refleksi (220) dalam Gambar 3. Dari spesimen A2D0n hingga A2D5n memperlihatkan ada perubahan orientasi kristal ke arah bidang refleksi (220) dan

penghalusan Rietveld agak sukar melakukan *fitting*. Intensitas hamburan neutron teramati meningkat hampir lipat tiga dari 31.865 *counts* hingga 84.024 *counts* dari spesimen A2D0n ke spesimen A2D5n. Peningkatan terendah sebesar dua kali, terjadi pada spesimen A2D5n dengan cacahan sebesar 62.683 *counts*.

Kehadiran unsur dopan/impuritas dalam sistem kristal austenitik dan proses

mekanisasi rol panas dapat menimbulkan pergeseran struktur (*diffused structure*) dalam bahan paduan. Kedua faktor ini dapat mengganggu kesetimbangan *internal force* dalam sistem kristal bahan. Perbedaan tegangan *internal force* ini dikenal sebagai tegangan sisa (*residual stress*) dalam bahan. Fenomena ini dalam pola difraksi dapat diamati dari pergeseran dan pelebaran puncak profil.





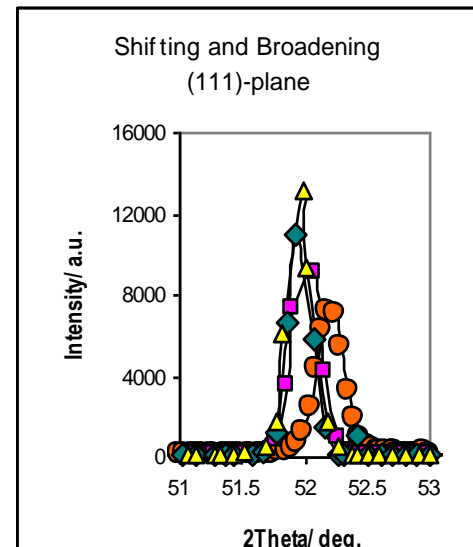
Gambar 3. Hasil penghalusan Rietveld pada spesimen A-2 non standar rol panas; A2D0n, A2D2n, A2D3n, A2D5n hasil reduksi 0%, 71%, 81% dan 87%.

Tabel 5. Angka pergeseran dan pelebaran puncak bidang (111) paduan A-2 non standar.

Spesi- men	Pergeseran (deg.)		Pelebaran (deg.)	
	2θ	Δ2θ	FWHM	ΔFWHM
A2D0n	52,19	0	0,2420	0
A2D2n	52,09	-0,10	0,2233	-0,0187
A2D3n	51,92	-0,17	0,1897	-0,0523
A2D5n	51,98	0,06	0,2509	0,0625

Gambar 4 memperlihatkan pola pergeseran dan pelebaran struktur kristal bahan spesimen pada bidang refleksi (111) yang nilai angkanya disusun pada Tabel 5. Bidang refleksi (111) untuk spesimen A2D0n yang tidak diberi perlakuan rol panas berada pada posisi  $2\theta = 52,19^\circ$  dengan lebar setengah puncak (FWHM)  $0,242^\circ$ , namun ketika diberi perlakuan rol panas sebesar 71% reduksi, bidang refleksi mengalami pergeseran sebesar  $-0,10^\circ$  dengan perbedaan lebar setengah puncak sebesar  $-0,0187^\circ$ . Dinamika pengembangan penyusutan struktur kristal ini berlanjut hingga spesimen A2D5n yang diberi perlakuan rol panas sebesar 87% reduksi, yang bergeser hingga  $0,06^\circ$  dan selisih pelebaran  $-0,0625^\circ$ . Bahkan pergeseran terbesar terjadi pada spesimen A2D3n yang diberi perlakuan rol

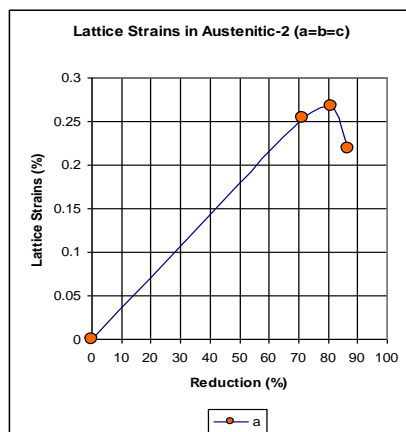
panas sebesar 81% reduksi, puncak bidang refleksi (111) berada pada posisi  $2\theta = 51,92^\circ$  dan selisih pelebaran puncak  $-0,0523^\circ$ .



Gambar 4. Pergeseran dan pelebaran puncak bidang (111) pada spesimen A-2 non standar rol panas; A2D0n, A2D2n, A2D3n, A2D5n hasil reduksi 0%, 71%, 81% dan 87%.

Jarak interplanar berbanding langsung dan dapat dihitung dari parameter kisi dengan hubungan  $d = a / \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$ . Persamaan  $\epsilon = (d - d_0) / d_0$  digunakan untuk menghitung regangan kisi rata-rata sepanjang arah kristalografi tertentu, dimana  $d$  merupakan jarak kisi bahan tertegang, sedang kisi  $d_0$  adalah jarak kisi bebas tegangan (referensi). Dalam eksperimen ini, *fitting* terhadap data difraksi cukup baik ( $Rwp = 13-15\%$ ),

diperoleh untuk setiap spesimen baja tahan karat. Hasil ini mengimplikasikan kepresisian data eksperimen. Pada kasus ini tensor regangan disesuaikan dengan simetri kristal. Jumlah komponen bebas dapat direduksi menjadi satu komponen bebas; yakni ke arah kisi-a. Hal ini disebabkan austenit merupakan struktur kristal uniaksial dan hanya satu komponen bebas diperlukan untuk menyatakan sifat sifat tensor secara lengkap [9]. Sepanjang arah lain (arah kisi-b dan kisi-c), regangan dapat dihitung menggunakan aljabar tensor. Penentuan komponen regangan sepanjang arah sumbu prinsip (a-b-c) dalam aturan struktur konvensional sangat dianjurkan. Untuk fasa austenit adalah sumbu-a, karena berstruktur kubik. Hasil pengukuran yang dirangkai dengan analisis Rietveld disusun dalam Tabel 4.



Gambar 5. Regangan kisi baja struktur A-2 non standar rol panas, hasil reduksi 0%, 71%, 81% dan 87%.

Regangan hidrostatis  $\varepsilon$ , sepanjang arah dengan acuan pada arah spesimen, dapat dihitung dengan:  $\varepsilon_{av} = (1/4\pi) \int_{\Omega} \varepsilon_{hkl} d\Omega$  dimana  $\varepsilon_{hkl}$  adalah regangan dalam butiran yang arah  $[hkl]$ -nya terletak dalam arah yang diamati. Integrasi dilakukan untuk seluruh arah butiran secara random. Solusi untuk fasa austenit, persamaan tersebut menjadi  $\varepsilon_{av} = \varepsilon_a$ . Oleh karena fasa austenit bersifat uniaksial dan harga rata-ratanya menjadi sama dengan regangan kisi itu sendiri. Peregangan kisi kristal dapat dihitung

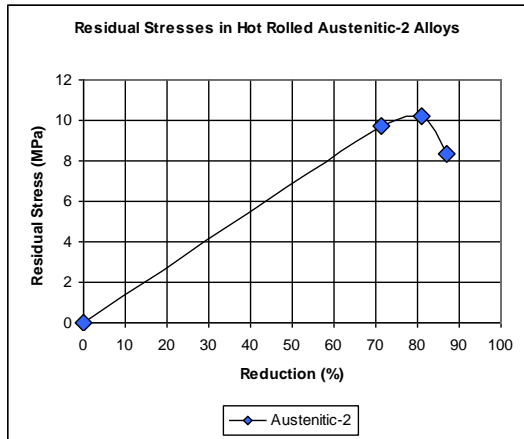
dengan menganalogikan persamaan  $\varepsilon = (d - d_0)/d_0$  menjadi  $\varepsilon_a = (a - a_0)/a_0$ .

Gambar 5 memperlihatkan kelakuan regangan kisi (*strain energy*) rata-rata dalam bahan struktur A-2 non standar akibat mekanisasi pengerolan panas. Saat bahan direduksi 71% ketebalan, *strain energy* meningkat hingga 0,25% dan mencapai puncak sebesar 0,27% pada reduksi 81%. Peningkatan peregangan kisi kristal ini terjadi akibat ada pergeseran bidang-bidang kristal (*slip plane*) oleh mekanisme pengerolan yang mampu meningkatkan kekuatan mekanik berupa pengerasan regangan (*strain hardening*) bahan. Akan tetapi hukum alamiah (distribusi normal; *Gauss distribution*) tetap berlaku ketika bahan mencapai titik leleh kekuatan. Fenomena ini terjadi juga pada bahan A-2 non standar, yang mengalami penurunan peregangan sebesar 0,23% meskipun reduksi pengerolan ditambah hingga 87%. Gambar 5 menginformasikan bahwa secara ekstrapolasi peregangan kisi kristal cenderung menurun walaupun reduksi terus bertambah. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh nilai energi peregangan rata-rata sudah melampaui batas bidang slip titik leleh maksimum, dan akan mengakibatkan kekuatan mekanik bahan menjadi berkurang.

Regangan kisi rata-rata pada Gambar 5 diperoleh dari sebuah pola difraksi untuk daerah angular yang luas, yang mewakili beberapa regangan rata-rata banyak arah dalam bidang difraksi. Metode ini merupakan pengukuran tegangan sisa (hidrostatis) yang mengkomplementasi pengukuran tegangan sisa sepanjang arah orientasi tertentu seperti yang dilakukan dengan *Powder Diffraktometer (PD-Stress)*. Tegangan hidrostatis,  $\sigma$ , dikaitkan dengan regangan hidrostatis [10] dalam persamaan;  $\sigma = (E/(1-2\nu))\varepsilon_{av}$ , dimana E adalah modulus Young dan  $\nu$  adalah pembanding Poisson yang ditentukan dari pengukuran tersendiri. Parameter terregresi untuk bahan stainless



steel 304 berurut-turut adalah 187 GPa dan 0,293<sup>[8]</sup>.



Gambar 6. *Residual stress* dalam baja struktur A-2 non standar rol panas, hasil reduksi 0%, 71%, 81% dan 87%.

Gambar 6 merupakan grafik tegangan sisa akibat mekanisasi pengerolan panas, yang diperoleh dengan perumusan  $\sigma = [E/(1 - 2\nu)]\varepsilon_{av}$ . Untuk fasa tunggal baja struktur A-2 non standar (*fcc*), dimana harga  $\varepsilon_{av} = \varepsilon_a$ , fenomena kecenderungan distribusi tegangan sisa bahan struktur A-2 non standar hasil pengerolan adalah tegangan tarik (*tensile stress*). Pengerolan hingga reduksi 71% membangkitkan tegangan sisa tarik sebesar 9,7 MPa sedangkan tegangan sisa terbesar 10,2 MPa terjadi pada reduksi 81%. Selanjutnya tegangan sisa meluruh kembali hingga 8,3 MPa terjadi pada reduksi sebesar 87%. Kelakuan tegangan sisa bahan ini mengikuti kelakuan regangan kisi kristal (*strain energy*) rata-rata. Sesuai prediksi matematis, *slope* kenaikan tegangan sisa bahan antara reduksi 0% hingga 71% adalah sekitar 0,14. Hal ini berarti bahwa kenaikan tegangan sisa meningkat cukup tajam pada reduksi di bawah 71%. Tegangan sisa bahan berangsur meningkat pada saat dilakukan proses pengerolan dan mencapai optimum sebesar 10,5 MPa pada reduksi ketebalan sekitar 77,3%. Di atas

reduksi ini (77,3%) tegangan sisa akan menurun kembali dengan perbedaan *slope/kemiringan* sekitar -0,18.

## SIMPULAN

Dari hasil analisis tegangan sisa bahan baja A-2 non standar yang diperlakukan rol panas dapat disimpulkan bahwa:

Teknik difraksi dapat digunakan untuk pengukuran tegangan sisa hidrostatik yang merupakan komplementasi dari pengukuran tegangan sisa sepanjang arah orientasi tertentu. Peningkatan peregangan bahan baja A-2 non standar terjadi akibat pergeseran bidang-bidang kristal (*slip plane*) oleh mekanisme pengerolan, dan mampu meningkatkan kekuatan mekanik berupa pengerasan regangan (*strain hardening*) bahan. Pengerolan hingga reduksi 71% menimbulkan peregangan kisi sebesar 0,25% dan tegangan sisa tarik sebesar 9,7 MPa sedangkan peregangan kisi sebesar 0,27% dan tegangan sisa terbesar 10,2 MPa terjadi pada reduksi 81%. Selanjutnya peregangan kisi dan tegangan sisa meluruh kembali berturutan hingga 0,23% dan 8,3 MPa terjadi pada reduksi pengerolan panas sebesar 87%. Fenomena kecenderungan distribusi tegangan sisa bahan struktur A-2 non standar hasil perlakuan pengerolan panas adalah *tensile stress* (tegangan positif) bukan *compressive stress* (tegangan negatif).

## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan tulus hati penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada: Bpk. Ir. Yuswono, M.Eng. APU., Dr. Andon Insani, Sdr. Imam Wahyono, S.ST., Sdr. Sumaryo, A.Md. dan Drs. Antonius Sitompul, M.Sc. serta semua pihak atas bantuan dan kerjasamanya.

---

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Almen, J.O. & P.H. Black (1963), *Residual Stresses and Fatigue in Metals*, Mc Graw-Hill, New York.
- [2]. Parikin (2000), *Determination of Residual Stresses in Cold-Rolled 304 Stainless Steel Plates Using Diffraction Technique and Rietveld Analysis*, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- [3]. Cullity, B.D., (1995), *Introduction to X-ray Diffraction*, 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, New York.
- [4]. Young, R.A. (1997), *The Rietveld Method*, IUCr Book Series 5, International Union of Crystallography, Oxford University Press, UK.
- [5]. Effendi, N. (2010), *Austenitic Type Stainless Steel Production By Foundry Technology*, Urania, *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, PTBN-BATAN:16 (2), Hal.69–77.
- [6]. ASM Handbook (1990), *Properties and Selection Iron, Steel, and High Performance Alloys*, 1, 10<sup>th</sup> ed., New York.
- [7]. Parlane, A.J.A. (1978), *The Determination of Residual Stresses*, Welding Institute, pp. 63-78, Cambridge.
- [8]. Villars, P., and L.D. Calvert (1991), *Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases*, 2<sup>nd</sup> edition, Vol.3 & 4, pp. 3824-6 and pp. 4471-2, ASM International, USA.
- [9]. Nye, J.F. (1985), *Physical Properties of Crystals*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom.
- [10]. Noyan, I.C. & Cohen, J.B. (1987), *Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer-Verlag, New York.