

DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA DAERAH TERPENGARUH PANAS BAJA LASAN MENGGUNAKAN METODA DIFRAKSI NEUTRON

Andika Fajar, Praswad, Gunawan, M.Rifai Muslich
PPSM)-BATAN, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang 14310

ABSTRAK

DISTRIBUSI TEGANGAN SISA PADA DAERAH TERPENGARUH PANAS BAJA LASAN MENGGUNAKAN METODA DIFRAKSI NEUTRON. Telah dilakukan pengukuran distribusi tegangan sisa tiga dimensi pada daerah terpengaruh panas dari baja lasan berketebalan 10 mm menggunakan teknik difraksi neutron. Pengaruh tegangan sisa yang timbul akibat proses pengelasan berada pada jarak $\pm 6,25$ mm dari pusat lasan. Tegangan tensil yang paling besar terletak pada arah X, yang besarnya sepanjang posisi melintang cuplikan lebih dari 2000 MPa. Pada arah Y dan Z juga mengalami tegangan tensil dengan harga mutlak berada di antara 500 sampai 1500 MPa. Serta dapat diketahui bahwa tegangan di daerah pinggir cuplikan lebih besar daripada di daerah tengah cuplikan.

ABSTRACT

RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION IN HEAT AFFECTED ZONE OF WELDED STEEL BY MEANS OF NEUTRON DIFFRACTION METHOD. Three dimensional residual stress distribution in the heat affected zone of 10 mm thick welded steel by means of neutron diffraction technique has been measured. The results showed that the residual stress was distributed near the welded metal, namely within about $\pm 6,25$ mm. The major tensile stresses occurred in the X-direction, and they attained a level greater than 2000 MPa through the position far away from the weld. The tensile stresses in the Y and Z-directions lied between 500 and 1500 MPa. The results also suggest that the stress in the surface was greater than that in the middle of the sample.

PENDAHULUAN

Bila kelelahan (*fatigue*) dan *stress corrosion crack* pada daerah sekitar lasan bahan struktural berukuran besar menjalar, tegangan sisa pada daerah belahan lasan menjadi bebas, maka tegangan sisa pada arah depan belahan juga mengalami distribusi kembali. Bersamaan dengan itu, distribusi koefisien muai tegangan akan berubah, sehingga gerakan menjalarnya belahan juga mengalami perubahan terhadap gerakan yang diprediksi dari distribusi tegangan sisa awalnya [1]. Untuk memperkirakan umur sisa bahan dengan ketelitian tinggi yang mempertimbangkan menjalarnya belahan, diperlukan pengembangan teknik yang dapat menguji secara tak merusak distribusi kembali tegangan sisa yang timbul bersamaan menjalarnya belahan permukaan ke bagian dalam bahan struktural. Analisis simulasi dengan menggunakan metoda elemen hingga (*finite element method*) merupakan metoda

pengujian yang sedang dikembangkan saat ini. Di pihak lain, teknik pengukuran gerakan distribusi kembali tegangan sisa secara tak merusak, untuk melengkapi analisis secara numerik tersebut juga merupakan topik yang masih dalam penelitian dan pengembangan sekarang.

Metoda difraksi sinar-X merupakan contoh konvensional dari teknik pengukuran tegangan sisa secara tidak merusak. Tetapi daya tembus sinar-X sangat rendah yakni hanya sekitar $20 \mu\text{m}$ [2], sehingga tidak dapat digunakan untuk mengukur tegangan sisa internal yang diperlukan untuk menguji penjalaran belahan. Sebaliknya, neutron memiliki daya tembus yang tinggi, misalnya pada bahan baja dapat menembus sampai kedalaman 50 mm, sehingga memungkinkan melakukan pengukuran tegangan sisa internal dari bahan struktural lasan yang tebal. Dengan memanfaatkan sifat neutron yang unik ini Instalasi Spektrometri Neutron-PPSM BATAN sedang mengembangkan teknik pengukuran tegangan sisa menggunakan

metoda difraksi neutron di Indonesia, bekerjasama dengan Departemen Fisika JAERI Jepang. Pada makalah ini akan dijelaskan mengenai pelaksanaan dan hasil pengukuran tegangan sisa pada daerah terpengaruh panas dari baja lasan yang diterima dari PT. Krakatau Steel.

TATA KERJA

1. Pengukuran tegangan sisa menggunakan metoda difraksi neutron.

Berkas neutron yang datang pada cuplikan mengalami hamburan mengikuti syarat difraksi Bragg, sama dengan metoda difraksi sinar-X. Bagian dalam bahan struktural berada dalam keadaan tegangan tiga sumbu Cartesian X, Y, Z, karena itu metoda analisis $\sin^2\Psi$ pada difraksi sinar X tidak dapat dipergunakan. Di mana Ψ adalah sudut yang dibentuk garis normal bidang miring terhadap permukaan cuplikan. Sehingga pengukuran regangan pada arah tiga sumbu dilakukan dari perubahan jarak antar bidang difraksi $\Delta d = d - d_0$, atau perubahan sudut difraksi $\Delta\theta$. Untuk ini diperlukan jarak antar bidang kisi dalam keadaan bebas regangan d_0 atau sudut difraksi θ_0 . Penentuan posisi puncak dari pola difraksi adalah, bila pada metoda difraksi sinar-X diterapkan cara mencari titik tengah dari harga setengah lebar maksimum (FWHM), maka pada metoda difraksi neutron dipergunakan metoda penentuan puncak dari titik tengah pola difraksi yang telah didekati dengan fungsi distribusi Gaussian.

Tegangan tidak dapat ditentukan dengan hanya mengukur regangan pada satu sumbu, maka pada metoda difraksi neutron tegangan ditentukan dengan terlebih dahulu melakukan pengukuran regangan pada arah tiga sumbu X, Y dan Z. Bila ϵ_x adalah regangan arah X, ϵ_y adalah regangan arah Y, dan ϵ_z adalah regangan arah Z, maka tegangan ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) \right] \\ \sigma_y &= \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_y + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) \right] \\ \sigma_z &= \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) \right]\end{aligned} \quad (1)$$

Di mana harga rata-rata regangan ke arah vektor hamburan Q dalam volume cuplikan ditentukan dari :

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -(\theta - \theta_0) \cot \theta_0 \quad (2)$$

Bila ingin mengetahui tegangan utama dan arahnya memerlukan pengukuran regangan pada arah enam sumbu. Dari persamaan (1) dapat diketahui bahwa untuk menghitung tegangan dari regangan pada arah tiga sumbu, diperlukan modulus Young (E) dan perbandingan Poisson (ν). Adapun untuk cuplikan yang digunakan kali ini, harga konstanta tersebut adalah masing-masing $E=230$ Gpa dan $\nu=0,3$.

Gambar 1 memperlihatkan skema peralatan difraktometer neutron yang digunakan untuk pengukuran tegangan sisa yang terpasang di ujung berkas tangensial S6 balai percobaan reaktor riset serba guna G.A. Siwabessy, kawasan Puspipetek Serpong. Berkas neutron termal yang dihasilkan di dalam reaktor dimonokromatisasi dengan mendifraksikannya pada monokromator kristal tunggal PG(004), dan didapat berkas neutron dengan panjang gelombang 0,1924 nm. Setelah kolimator-2 dipasang slit kadmium yang mudah menyerap neutron untuk menentukan daerah volume cuplikan dari berkas neutron datang. Percobaan kali ini menggunakan slit berbentuk lingkaran dengan diameter 3 mm baik untuk berkas datang dan berkas yang dihamburkan cuplikan ke detektor. Untuk mendeteksi neutron dipergunakan detektor sensitif posisi dengan panjang aktif 256 mm, serta sudut hamburan setiap kanal adalah 0,0138°. Pada pengukuran dengan menggunakan 512 kanal, sudut difraksi 2θ selebar 7,06° dapat diselesaikan dengan hanya sekali pengukuran. Slit berkas datang dan slit berkas yang didifraksikan, keduanya dapat digerak-gerakkan (*movable slit*), dan untuk memperbaiki resolusi posisi, kedua slit ditempatkan mendekat terhadap cuplikan yang akan diukur.

Pada difraksi neutron, tegangan sisa diperoleh dari hasil pengukuran regangan tiga sumbu, karena itu secara ideal sudut difraksi pada cuplikan dibuat mendekati 90°, dan bentuk slit berkas datang dan berkas difraksi adalah berbentuk lingkaran. Pada pengukuran kali ini telah digunakan slit berbentuk lingkaran, tetapi dikarenakan keterbatasan gerak lengan detektor,

maka pencacahan dilakukan pada bidang refleksi (110) dengan sudut refleksi $2\theta_s = 57^\circ$.

2. Cuplikan baja lasan

Cuplikan yang akan diukur adalah baja lasan yang diambil dari pipa yang dilas berbentuk spiral seperti terlihat pada gambar 2. Ukuran cuplikan adalah, panjang 105 mm, tinggi 90 mm, dan tebal 10 mm.

Seperti telah disebutkan di atas, pada pengukuran tegangan sisa menggunakan difraksi neutron memerlukan pengukuran dari jarak antar bidang kisi dalam keadaan bebas regangan dengan ketelitian yang baik. Cuplikan yang akan diasumsikan bebas regangan berasal dari pelat bahan yang sama, dan diambil pada posisi yang berada jauh dari pusat lasan. Lalu dilakukan anil selama tiga jam pada suhu 700° dalam udara bebas untuk menghilangkan tegangan sisa yang masih ada di dalam bahan. Jarak antar bidang kisi dalam keadaan bebas regangan $d(hkl)_0$ didapatkan dari pengukuran pola difraksi cuplikan ini.

Cuplikan dipasang di atas goniometer tiga sumbu X-Y-Z. Goniometer dapat bergerak secara horizontal pada arah sumbu X dan Y, serta vertikal dengan arah sumbu Z, kemudian dapat diputar secara manual 90° . Pergerakan goniometer tiga sumbu dikontrol dengan komputer dan digerakkan melalui *stepping motor*. Karena itu setelah menetapkan posisi yang menjadi titik acuan pencacahan, semua penetapan posisi pengukuran berikutnya dapat dilaksanakan oleh komputer secara otomatis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pola difraksi (pergeseran puncak Bragg)

Pada gambar 3 diperlihatkan pergeseran pola difraksi dari refleksi bidang (110) di mana vektor hamburannya paralel dengan arah koordinat X cuplikan, sebagai fungsi dari jarak menjauh pusat lasan. Kurva telah dipindahkan secara vertikal untuk memperjelas. Garis tebal pada gambar didapat dari fitting menggunakan fungsi Gaussian. Dari pergeseran puncak pola difraksi ini menunjukkan terdapatnya perubahan jarak antar bidang kisi kristal pada daerah-daerah pengukuran tersebut, yang disebabkan adanya tegangan sisa di dalam bahan.

Posisi puncak pola difraksi hasil fitting untuk arah X, Y dan Z pada daerah melintang lasan ditunjukkan pada gambar 4. Puncak difraksi

tersebut diukur pada daerah volume cuplikan yang sama untuk semua arah. Berdasarkan persamaan (2), regangan positif atau regangan tensil didapatkan untuk perpindahan puncak dari sudut acuan ke sudut yang lebih kecil, dan perpindahan ke arah sudut yang lebih tinggi menghasilkan regangan negatif atau kompresi.

Kemudian perubahan lebar pola difraksi untuk arah Y dapat dilihat pada gambar 5. Pelebaran pola difraksi ini yang melebihi resolusi peralatan, mungkin saja disebabkan oleh perbedaan pengaruh anil dari butiran lasan selama proses pengelasan, dan menunjukkan inhomogenitas cuplikan [3].

2. Pengukuran jarak d_0

Pengukuran jarak antar bidang kisi pada difraksi bidang (110) dari cuplikan bebas regangan yang diambil dari bagian pipa yang jauh dari lasan, dan telah dilaksanakan perlakuan panas (700° selama 2 jam) untuk menghilangkan regangan sebelum melakukan pengukuran tegangan sisa. Dari hasil pengukuran diperoleh jarak antar bidang kisi d_0 sekitar 0,2014 nm.

3. Regangan sisa

Hasil pengukuran regangan sisa melintang daerah lasan pada arah X, Y, dan Z cuplikan ditunjukkan pada gambar 6. Pengukuran dilakukan pada pusat lasan dan pada jarak 9,25 mm, 18,5 mm, 27,75 mm, 37 mm, dan 46,25 mm ke arah kiri dan kanan pusat lasan. Dalam gambar diperlihatkan pula distribusi regangan sisa dengan arah kedalaman posisi pengukuran seperti terlihat pada gambar 2, sebagai parameter. Dari gambar dapat diketahui bahwa jarak menjauh sekitar 46,25 mm dari pusat lasan, regangan sisanya hampir tidak berpengaruh lagi untuk semua arah.

Seperti terlihat pada gambar, regangan sisa pada arah X sepanjang garis melintang lasan mengalami regangan tensil dengan harga regangan yang hampir sama, kemudian mengecil pada daerah pengukuran yang terjauh dari lasan. Untuk pengukuran yang lebih dekat ke permukaan mengalami regangan tensil yang lebih besar. Besar regangannya berada di antara $8,359 \times 10^{-3}$ pada bagian pinggir, dan $2,27 \times 10^{-4}$ pada bagian tengah. Regangan sisa ini bergantung pada posisi kedalaman cuplikan. Regangan sisa arah X, makin ke dalam makin kecil regangannya dibanding di pinggir.

Untuk regangan sisa pada arah Y, sebagian besar adalah regangan tensil, dan nilainya semakin

besar pada posisi semakin jauh dari lasan. Kemudian regangan sisa pada arah Z, hampir seluruhnya mengalami regangan kompresi. Pada kedua arah ini harga mutlak regangannya kecil dan perbedaan antara daerah pinggir dan tengah juga relatif kecil.

4. Tegangan sisa

Dengan menggunakan persamaan (1), distribusi regangan sisa yang terlihat pada gambar 6 dapat dikonversi menjadi distribusi tegangan sisa. Hasilnya diperlihatkan pada gambar 7, masing-masing adalah distribusi tegangan sisa pada arah X, Y, dan Z. Pola distribusi tegangan sisa hampir serupa dengan distribusi regangan sisa, yang ditunjukkan pada gambar sebelumnya. Di sini karena pengukuran arah Z hanya diperoleh 7 titik maka perhitungan tegangan sisanyapun hanya dapat dilakukan pada jumlah titik yang sama pula.

Bila diperhatikan tegangan sisa arah X, pada gambar dapat dilihat semuanya mengalami tegangan tensil. Pada daerah lasan tegangan sisanya adalah 2490 MPa untuk posisi di tengah, dan 2690 MPa untuk di daerah pinggir cuplikan. Pada jarak menjauh dari lasan harganya tidak mengalami perubahan yang berarti, hanya untuk daerah tengah cuplikan harganya turun drastis mendekati nol di daerah ujung cuplikan. Pada daerah sebelah kanan pusat lasan tegangan sisa bagian pinggirnya lebih besar daripada bagian tengah, tetapi pada arah negatif terhadap pusat lasan terjadi hal yang sebaliknya. Hasil yang sama juga dapat dilihat untuk arah Y dan Z. Hasil yang diperoleh ini sangat dipengaruhi kondisi cuplikan yang diukur. Dikarenakan keadaan cuplikan yang tidak simetris, sehingga mempersulit menentukan penempatan posisi berkas di dalam cuplikan secara teliti. Seperti terlihat pada gambar 2, bagian tengah pengukuran, untuk daerah sebelah kiri pusat lasan menjadi lebih dekat ke pinggir cuplikan, begitu pula sebaliknya, bila di sebelah kanan lebih dekat ke pinggir, di sebelah kiri menjadi lebih ke tengah.

Kecendrungan pola distribusi tegangan sisa yang sama dengan arah X terlihat pula untuk arah Y dan Z. Namun harga absolutnya jauh lebih kecil dibandingkan dengan arah X, kecuali untuk daerah di ujung cuplikan.

KESIMPULAN

Pengukuran tegangan sisa pada baja lasan yang diterima dari PT Krakatau Steel telah dilakukan untuk mengamati distribusi tegangan

sisanya pada posisi melintang pusat lasan. Dengan hasil sebagai berikut :

1. Pengaruh tegangan sisa yang timbul karena proses pengelasan berada pada jarak 46,25 mm dari pusat lasan.
2. Tegangan tensil yang paling besar terletak pada arah X, yang besarnya sepanjang arah melintang lasan adalah lebih dari 2000 MPa.
3. Tegangan sisa pada arah Y dan Z juga mengalami tensil, dengan harga mutlak yang relatif sama besarnya berada di antara 500 sampai 1500 MPa.
4. Tegangan di daerah pinggir cuplikan terlihat lebih besar di dibandingkan di tengah cuplikan untuk semua arah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh rekan-rekan kelompok Hamburan Neutron Instalasi Spektrometri Neutron (ISN) - Pusat Penelitian Sains Materi (PPSM) BATAN, atas kerjasamanya sehingga makalah ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. HAYASHI, M., ISHIWATA, M., MORII, Y., dan MINAKAWA, N., "Residual Stress Distribution in Carbon Steel Pipe Welded Joints Measured by Neutron Diffraction", 1995 (akan diterbitkan pada majalah Nihon Zairyo Gakkai - dalam bahasa Jepang)
2. CULLITY, B.D., Elements of X-ray Diffraction, ed. kedua (Reading, M.A. : Addison-Wesley)
3. SMITH, D.J., LEGATT, R.H., WEBSTER, G.A., MACGILLIVRAY, H.J., WEBSTER, P.J., MILLS, G., *Neutron Diffraction Measurements of Residual Stress and Plastic Deformation in an Aluminium Alloy Weld*, J. Strain Analysis, 23, (1988), 201

TANYA JAWAB

Suprpto

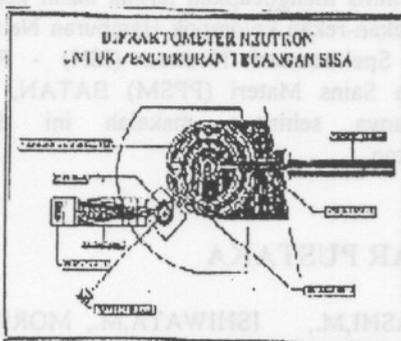
- Dari hasil pengukuran didapatkan tegangan sisa yang paling besar pada arah X yaitu 2000 Mpa.

(atau sekitar 20.000 kg/cm^2). Padahal tegangan tensil baja misalnya baja 50 sekitar 5000 kg/cm^2

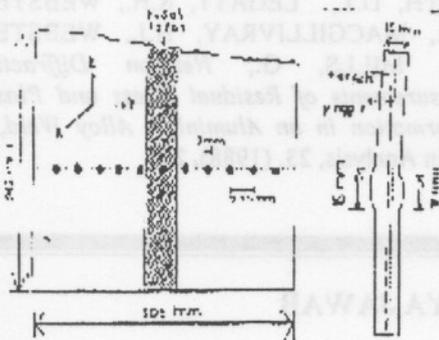
- Apakah hasil pengukuran tersebut sudah relevan
- Jika hasil pengukuran benar, maka bahan (baja) tersebut sudah patah mohon penjelasan

Andika Fajar

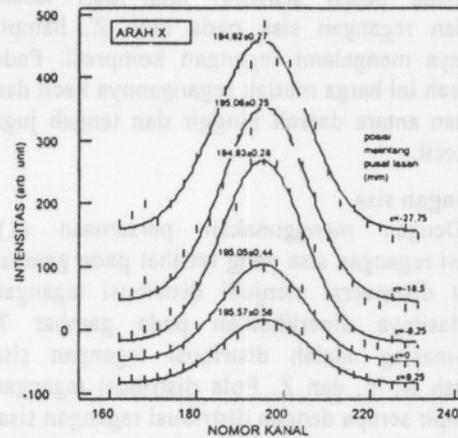
- Sebelum kami melakukan pengukuran menggunakan peralatan ini, kami telah melakukan pada cuplikan baja lengkung yang telah diukur di JAERI Jepang, dan hasilnya mendekati. Sehingga sementara kami yakin nilai yang kami peroleh dapat dipercaya. Besarnya nilai tegangan sisi pada arah X ini mungkin juga dipengaruhi oleh pemotongan termal dari baja atau lasan yang menyebabkan tegangan tegangan sisanya menjadi lebar besar.



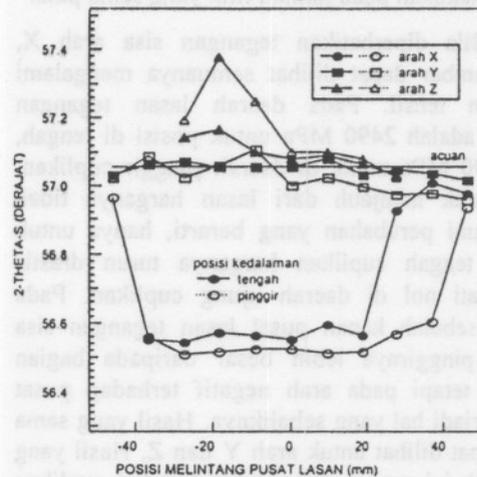
Gambar 1. Skema difraktometer neutron untuk pengukuran tegangan sisa (DNI-M) yang dipasang pada ujung berkas tangensial S-6 di balai percobaan reaktor riset RSG-GAS Serpong



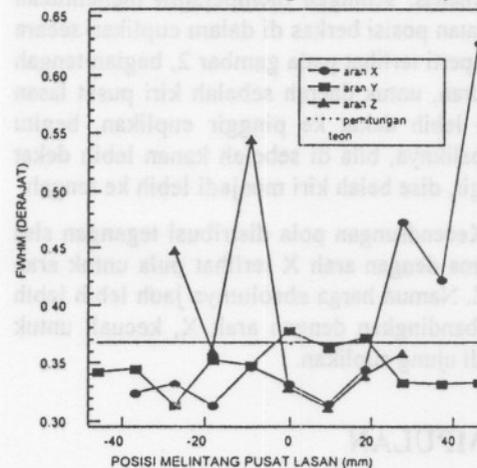
Gambar 2. Geometri cuplikan baja lasan dan po-sisi pengukuran. Yang diarsir menunjukkan daerah lasan.



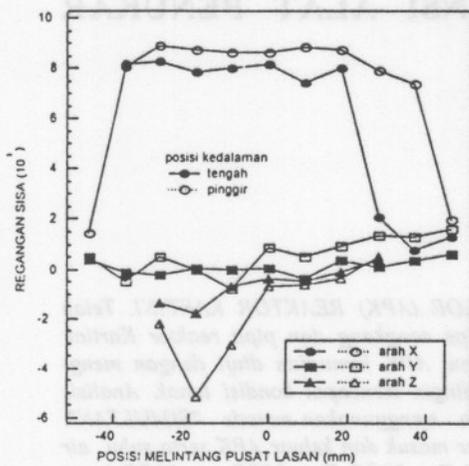
Gambar 3. Pola difraksi dari refleksi bidang (110) untuk arah X dengan pada posisi melintang pusat lasan



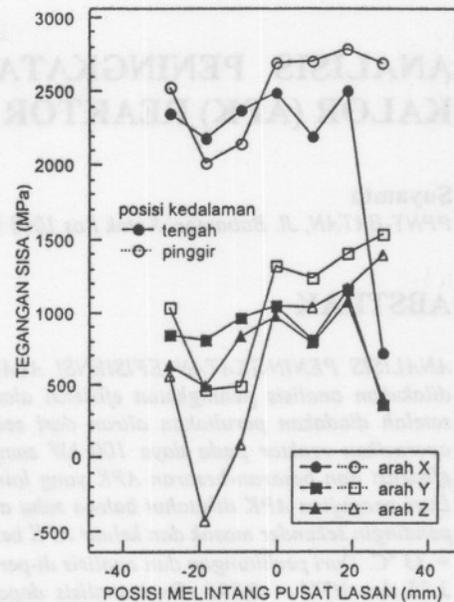
Gambar 4. Posisi puncak pola difraksi pada re-fleksi bidang (110) dari baja lasan



Gambar 5. Perubahan lebar pola difraksi untuk arah X, Y, Z pada posisi tengah cuplikan



Gambar 6. Distribusi regangan sisa tiga dimensi pada posisi melintang pusat lasan dari baja lasan



Gambar 7. Distribusi tegangan sisa tiga dimensi pada posisi melintang pusat lasan dari baja lasan

dilakukan setelah sistem siap akan dibandingkan di dalam APK sudah dan sistem akan search (power) flow ke sistem akan perlawanan (con- (v flow) Pengujian APK dilakukan dengan meng- operasi reaktor pada daya 100kW dan suhu air pendingin dalam keadaan tetap (steady state).

Di dalam makalah ini efisiensi APK dihitung dengan menggunakan metode simulas di mana parameter-parameter APK dihitung secara se- rikat dengan cara kali perhitungan dengan cara tabel.

TEORI

Analisis suatu APK dapat dilakukan dengan menggunakan bermacam-macam metode seperti

PENDAHULUAN

Analisis Reaktor Katalis (APK) merupakan suatu parameter yang sangat penting dalam me- nilai yang berkaitan dengan parameter reaktor katalis. APK digunakan untuk meng- agar parameter-parameter termodinamika dan kinetika yang ada di dalam reaktor katalis tidak melampaui batas operasi yang diinginkan. Untuk itu peng-aman dan analisis terhadap APK perlu dilakukan terus menerus agar suhu air pendingin tidak melampaui batas yang telah ditetapkan.

Sebelum telah diketahui bahwa besarnya sa- hu air pendingin reaktor katalis dan suhu APK dipengaruhi oleh beberapa faktor, maka cara lain yang dapat digunakan untuk mencari suhu air pendingin reaktor katalis APK dan suhu reaktor katalis APK adalah dengan menggunakan Analisis Reaktor Katalis (APK).