

Verifikasi Unjuk Kerja Difraktometer Neutron DN1-M Melalui Pengukuran Regangan Sisa Pada Tiruan Sampel Standar ISO VAMAS-TWA20 dan *Restand Shrink-Fit* Paduan Alumunium A7075

Iwan Sumirat, M. Refai Muslih, Iman Kuntoro
Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang 15314

ABSTRAK

Verifikasi Unjuk Kerja Difraktometer Neutron DN1-M Melalui Pengukuran Regangan Sisa Pada Tiruan Sampel Standar ISO VAMAS-TWA20 dan *Restand Shrink-Fit* Paduan Alumunium A7075. Untuk memverifikasi apakah prosedur operasional pengoperasian DN1-M telah sesuai dengan standar internasional dan data yang dihasilkan dari pengukuran menggunakan DN1-M akurat, maka dilakukan pengukuran distribusi regangan pada sampel *shrink-fit* silinder uniaksial paduan alumunium A7075. Hasil pengukuran distribusi regangan menggunakan DN1-M telah dibandingkan dengan hasil-hasil pengukuran distribusi regangan pada sampel serupa menggunakan difraktometer neutron milik beberapa negara Eropa. Secara kualitatif distribusi regangan hasil pengukuran menggunakan DN1-M menunjukkan kurva yang sama dengan kurva distribusi regangan dari pengukuran menggunakan difraktometer neutron beberapa negara Eropa tersebut. Perbedaan besaran kuantitatif regangan lebih banyak disebabkan oleh dimensi dan proses pembuatan dari sampel tersebut. Dari hasil perbandingan tersebut dapat diketahui bahwa difraktometer neutron untuk pengukuran tegangan sisa yang dimiliki PTBIN-BATAN memiliki kapabilitas yang diperlukan oleh suatu alat ukur tegangan sisa.

Kata Kunci : *shrink-fit*, paduan alumunium, difraktometer neutron, regangan

1 Pendahuluan

Tegangan sisa adalah tegangan penyeimbang (*auto-balancing stress*) yang ada pada suatu bahan ketika tidak ada gaya eksternal yang bekerja pada bahan tersebut dan pada kondisi temperatur konstan [1]. Secara umum, tegangan sisa disebabkan oleh inhomogenitas pada proses deformasi yang bersumber dari inkompatibilitas lokal yang ditimbulkan oleh satu atau lebih 3 fenomena fisis berikut: aliran plastis (*plastic flow*), perubahan volume, dan dilatasi termal. Relaksasi yang tidak sempurna dari proses deformasi elastik yang berhubungan dengan fenomena tersebut akan menghasilkan tegangan sisa [2].

Pengukuran tegangan sisa dapat dilakukan dengan metode uji merusak seperti misalnya teknik pengeboran [3], metode uji tanpa merusak - NDT (*Non Destructive Test*). Selain itu, metode numerik [4] juga sering digunakan untuk memperkirakan besaran dari tegangan sisa. Salah satu metode NDT konvensional untuk mengukur tegangan sisa adalah dengan menggunakan difraksi sinar-

X. Sinar-X memiliki daya tembus yang sangat rendah yakni hanya sekitar 20 mikron pada hampir semua bahan logam. Oleh sebab itu metoda difraksi sinar-X hanya dapat digunakan untuk pengukuran tegangan sisa di daerah permukaan sampel saja. Pengukuran NDT lain seperti ultrasonik sangat dipengaruhi oleh keberadaan tekstur pada bahan. Berbeda dengan sinar-X, neutron, yang tidak memiliki muatan listrik mampu menembus bahan sampai kedalaman beberapa centimeter di bawah permukaan. Selain itu, neutron tidak merusak ketika berinteraksi dengan sampel. Dengan demikian teknik difraksi neutron dapat digunakan untuk pengukuran tegangan sisa pada posisi jauh di bawah permukaan sampel [5].

Teknik difraksi neutron untuk pengukuran tegangan sisa (*residual stress*) merupakan teknik yang relatif baru bila dibandingkan dengan teknik difraksi sinar-X maupun teknik lainnya. Untuk dapat menghasilkan informasi tegangan sisa kualitatif maupun kuantitatif yang *reliable*, perlu dibuat suatu prosedur yang akan dijadikan sebagai prosedur baku bagi pengukuran tegangan sisa meng-

gunakan difraktometer neutron. Untuk maksud tersebut, ISO (*International Standard Organization*) telah membentuk sebuah tim yang diberi nama VAMAS TWA-20 [6] (*Versailles Project on Advances Material and Standards Technical Work Assistant-20*), yang merupakan kolaborasi internasional dengan tugas membuat definisi-definisi, langkah kerja, sampel yang digunakan, serta hal lainnya yang berkaitan dengan pengukuran tegangan sisa menggunakan teknik difraksi neutron. Selain itu, salah satu tujuan RESTAND (*Residual Stress Standard using Neutron Diffraction*) yang merupakan *research project* negara-negara Eropa adalah mengembangkan kepercayaan industri terhadap penggunaan teknik difraksi neutron untuk pengukuran tegangan sisa [7]. VAMAS TWA-20 dan RESTAND bekerja sama dalam merumuskan standar baku bagi pengukuran tegangan sisa menggunakan teknik difraksi neutron. Hasil kerjasama kedua tim tersebut berupa rekomendasi tentang persyaratan dan hal-hal apa saja yang harus dipenuhi oleh sebuah difraktometer neutron untuk dapat digunakan sebagai pengukur tegangan sisa dan menghasilkan data yang reliabel. Berkenaan dengan penggunaan sampel, tim tersebut merekomendasikan penggunaan salah satu dari beberapa sampel standar berupa sampel *shrink-fit* paduan aluminium dengan ukuran dan geometri tertentu.

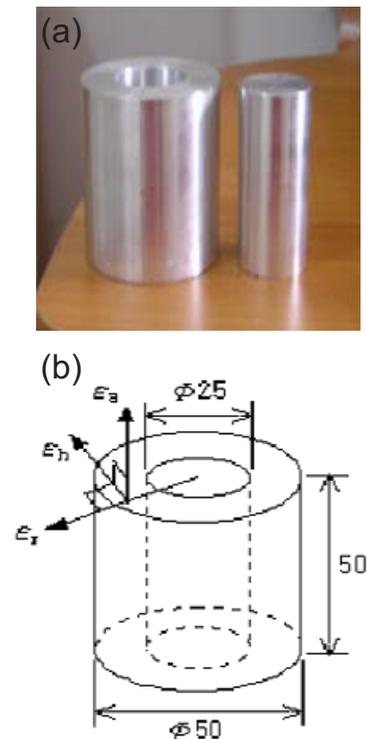
PTBIN-BATAN memiliki difraktometer neutron yang khusus digunakan untuk pengukuran tegangan sisa dengan nama DN1-M. Difraktometer ini menggunakan berkas neutron yang dihasilkan reaktor serbaguna GA Siwabessy (RSG-GAS) melalui lobang berkas S6. Penelitian ini bertujuan untuk memverifikasi apakah DN1-M memiliki kualitas yang sesuai standar internasional dan dapat menghasilkan data pengukuran tegangan sisa yang *reliable* atau tidak. Verifikasi ini dilakukan dengan cara melakukan pengukuran tegangan sisa pada sampel *ring-plug* paduan aluminium yang merupakan salah satu sampel rekomendasi dari ISO VAMAS TWA-20 dan RESTAND. Hasil pengukuran oleh DN1-M ini kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran oleh beberapa negara Eropa yang terlibat dalam proyek ISO VAMAS TWA-20 dan RESTAND.

2 Tata Kerja

2.1 Preparasi Sampel

Sampel *shrink-fit* yang digunakan pada penelitian ini memiliki kualifikasi yang sama dengan sampel standar ISO VAMAS TWA-20 dan RESTAND. Sampel tersebut

terdiri dari dua buah silinder yang terbuat dari paduan aluminium A7075. Satu silinder berfungsi sebagai *ring* dan silinder lainnya berfungsi sebagai *plug*. Diameter luar dari *ring* 50 mm dan diameter dalamnya 25 mm. Agar pada *ring-plug* terbentuk tegangan sisa, diameter *plug* lebih besar dari diameter dalam *ring*. Jadi *plug* dibuat dengan diameter 25,1 mm. Panjang atau tinggi dari *ring* dan *plug* sama yaitu 50 mm. Untuk memberikan perlakuan yang sama antara *ring* dan *plug*, maka keduanya dimasukkan bersamaan ke dalam nitrogen cair. *Ring* kemudian diangkat terlebih dahulu dan dibiarkan kembali ke temperatur kamar, sedangkan *plug* tetap masih dalam kondisi terendam nitrogen cair. Setelah suhu *ring* sama dengan lingkungannya, kemudian *plug* diangkat dari larutan nitrogen cair kemudian secepat mungkin dimasukkan ke dalam *ring*. Akibat efek termal, *plug* memuai di dalam *ring*. Karena diameter *plug* lebih besar daripada diameter *ring* maka *plug* akan terjepit oleh *ring*. Akibatnya, akan timbul tegangan sisa kompresif pada *plug* dan tensil pada *ring*. Foto dan dimensi sampel ditunjukkan pada gambar 1a dan 1b.



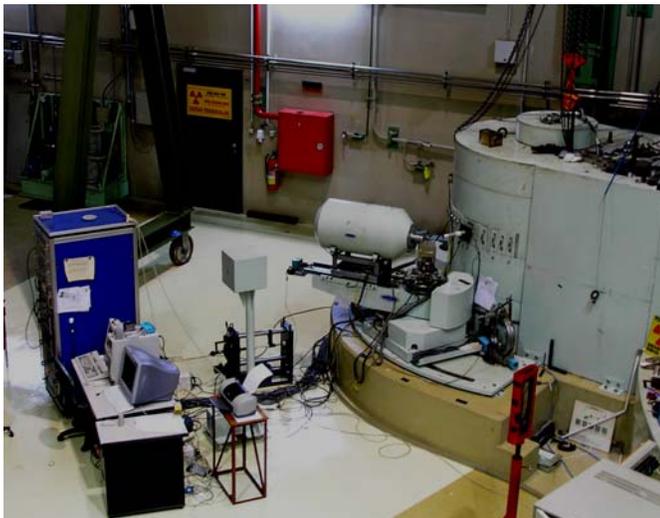
Gambar 1: (a). Foto sampel paduan aluminium *ring* (kiri) dan *plug*. (b). Dimensi sampel *shrink-fit* paduan aluminium (dalam mm).

Proses pembuatan sampel *shrink-fit* paduan aluminium A7075 ditunjukkan pada foto-foto pada gambar 2.



Gambar 2: Foto proses pembuatan sampel *shrink-fit* aluminium aloy A7075. Step-1 *plug* dimasukan ke dalam nitrogen cair, step-2 beberapa saat kemudian, step-3 sesaat setelah *plug* dimasukan ke dalam *ring*, step-4 pada kondisi stabil.

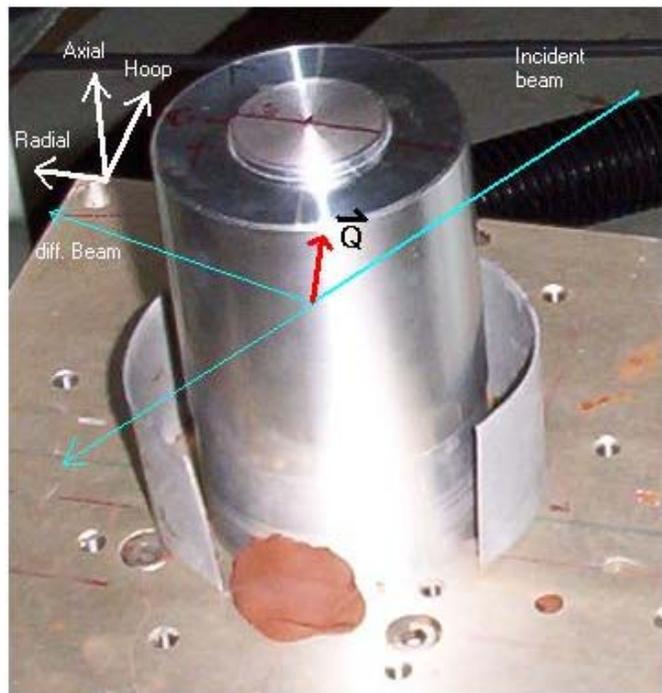
2.2 Pengukuran Mikrostrain



Gambar 3: Foto difraktometer neutron DN1-M.

Pengukuran mikrostrain dilakukan menggunakan DN1-M milik PTBIN yang berada di Experimental Hall reaktor riset (XHR) G.A. Siwabessy - BATAN Serpong. DN1-M merupakan difraktometer neutron serbuk (*powder diffractometer*) yang telah dimodifikasi sehingga dapat digunakan untuk pengukuran tegangan sisa. Pengukuran dilakukan pada bidang kristal (220) dan dalam 3 arah: radial, hoop, dan axial. Arah radial adalah arah pengukuran sepanjang jari-jari silinder, arah hoop adalah arah pengukuran tegak lurus terhadap arah radial, sedangkan arah

aksial adalah pengukuran sepanjang sumbu silinder. Titik-titik pengukuran diambil pada posisi pusat plug (0 mm); 10 mm; 12,5 mm; 13,75 mm; 17 mm; 20 mm; dan 23 mm arah radial silinder. Ukuran slit insiden 3 mm x 3 mm, dan slit detektor 3 mm x 10 mm. Panjang gelombang berkas neutron yang digunakan adalah 1.83375 .



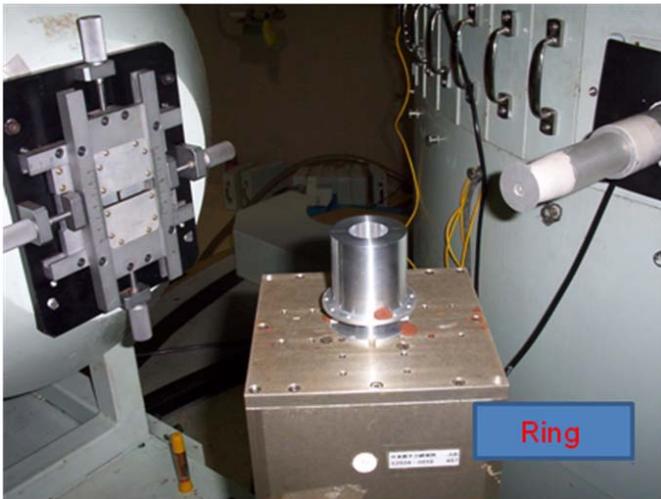
Gambar 4: Pengukuran sampel *shrink-fit* dan arah-arah pengukuran.

Untuk referensi sebagai sampel yang bebas tegangan sisa maka dilakukan pula pengukuran sampel serbuk paduan aluminium A7075. Data dari sampel referensi ini diperlukan untuk menghitung mikrostrain yang terjadi akibat adanya tegangan sisa. Gambar 3 menunjukkan foto difraktometer DN1-M, dan gambar 4 menunjukkan foto pengukuran mikrostrain pada sampel shrink-fit dan arah pengukurannya.

Gambar 5 dan 6 menunjukkan posisi pengukuran mikrostrain menggunakan difraktometer DN1-M masing-masing pada *plug* dan *ring* saja.



Gambar 5: Pengukuran mikrostrain pada *plug*.



Gambar 6: Pengukuran mikrostrain pada *ring*.

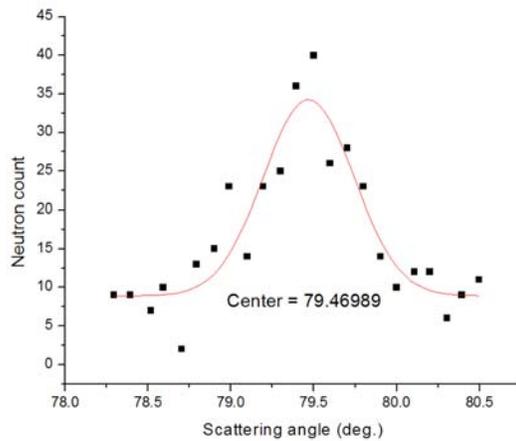
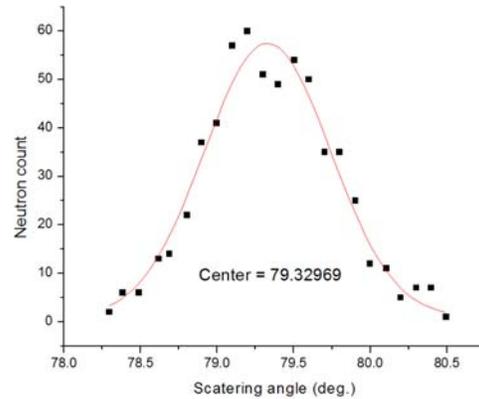
3 Hasil dan Pembahasan

Untuk mengukur mikrostrain pada sampel, hal pertama yang dilakukan adalah menentukan jarak antar kisi pada

kristal sampel yang tidak memiliki tegangan sisa, d_0 . Selanjutnya, besarnya mikrostrain dihitung menggunakan persamaan:

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (1)$$

dimana: ϵ adalah mikrostrain dari kisi-kisi kristal sampel, d_0 adalah jarak antar kisi sampel yang bebas tegangan sisa, d adalah jarak antar kisi pada sampel yang mengandung tegangan sisa.



Gambar 7: Salah satu hasil pengukuran cacahan neutron menggunakan DN1-M pada sampel referensi yang bebas tegangan sisa - d_0 (kiri) dan pada sampel yang mengandung tegangan sisa/*ring-plug* - d (kanan).

Besarnya d_0 dan d masing-masing ditentukan dari posisi puncak difraksi neutron pada bidang kristal sampel yang bebas tegangan sisa dan sampel yang mengandung tegangan sisa, dan dihitung menggunakan persamaan Bragg:

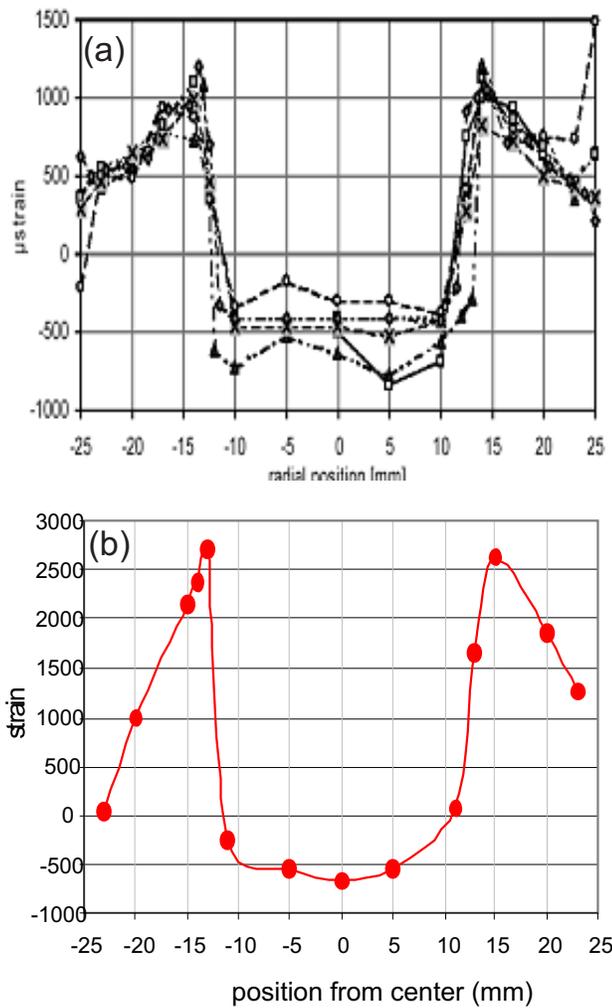
$$\lambda = 2d_0 \sin(\theta_0) \quad (2)$$

$$\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (3)$$

dimana: λ : panjang gelombang neutron, d_0 : jarak antar

kisi sampel yang bebas tegangan sisa, d : jarak antar kisi pada sampel yang memiliki tegangan sisa, θ_0 : posisi sudut hamburan dari puncak difraksi neutron pada sampel bebas tegangan sisa, θ : posisi sudut hamburan dari puncak difraksi neutron pada sampel yang mengandung tegangan sisa.

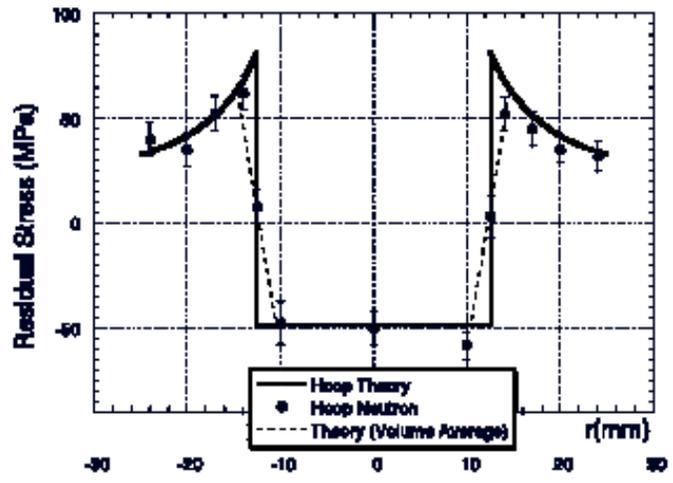
Pada gambar 7 ditunjukkan hasil pengukuran cacahan neutron menggunakan DN1-M. Terlihat bahwa puncak difraksi pada sampel *ring-plug* (*stressed condition*) mengalami pergeseran dibanding pada sampel referensi yang stress-free. Hal ini berarti bahwa bidang difraksi mengalami regangan akibat adanya tegangan sisa pada sampel.



Gambar 8: (a). Hasil pengukuran strain sampel standar diberbagai tempat: HMI, ISIS, GKSS, NPI, JRC. 8. (b). Hasil pengukuran μstrain dengan sampel yang serupa menggunakan difraktometer neutron DN1-M.

Pada gambar 8.a ditunjukkan hasil pengukuran mikrostrain yang dilakukan pada berbagai fasilitas difraktometer neutron yang ada di berbagai negara [8] seperti

Jerman (HMI, GKIS), Inggris (ISIS), Republik Ceko (NPI), dan European Joint Research Center (JRC). Sedang pada gambar 8.b. ditunjukkan hasil pengukuran mikro strain menggunakan DN1-M milik PTBIN-BATAN menggunakan persamaan (1). Dari kedua gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa pengukuran mikrostrain menggunakan DN1-M memberikan hasil yang sama dengan pengukuran oleh difraktometer di beberapa negara Eropa. Adanya perbedaan nilai mikrostrain pada pengukuran menggunakan DN1-M dan pengukuran menggunakan difraktometer negara-negara lain, kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan proses pembentukan *shrink-fit* dan pengukuran nilai d_0 .



Gambar 9: Perbandingan nilai tegangan sisa berdasarkan teori dan hasil pengukuran menggunakan teknik difraksi neutron pada sampel standar *shrink-fit*.

Webster dan Wimpory [9] telah melakukan pula pengukuran sampel *shrink-fit* dengan teknik hamburan neutron dan membandingkannya dengan perhitungan secara teori. Gambar 9 menunjukkan hasil perbandingan tersebut. Secara teoritis proses deformasi yang terjadi saat *plug* memuai kemudian tertahan dan terjepit oleh ring akan menghasilkan tegangan kompresi pada *plug* dan tegangan tensil pada ring. Gambar 7 dan 8 membuktikan hal tersebut, dimana pada posisi pusat *plug* sampai dinding *plug* tegangan sisanya menunjukkan tegangan kompresi yang direpresentasikan dengan harga mikrostrain negatif, sedangkan dari dinding *ring* ke arah luar, tegangannya bersifat tensil yang direpresentasikan sebagai mikrostrain positif. Gambar 9 membuktikan hal yang sama. Pada gambar 9 mikrostrain sudah dikonversi menjadi tegangan sisa. Hal-hal di atas menunjukkan bahwa teknik difraktometer neutron dapat digunakan untuk pengukuran tegangan sisa dan juga difraktometer neutron untuk pengukuran tegangan sisa milik PTBIN-Batan memiliki kemampuan yang

relatif sama dengan difraktometer neutron yang dimiliki negara-negara lain.

4 Kesimpulan

Unjuk kerja difraktometer neutron untuk pengukuran tegangan sisa, DN1-M yang berada di PTBIN - Batan telah diverifikasi dengan cara melakukan pengukuran pada sampel yang serupa dengan sampel standar yang direkomendasikan ISO VAMAS TWA-20 dan RESTAND. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa DN1-M menghasilkan kurva mikrostrain yang relatif sama dengan hasil pengukuran oleh difraktometer neutron yang ada di beberapa negara Eropa anggota ISO VAMAS TWA-20 dan RESTAND. Dari hasil verifikasi ini dapat disimpulkan bahwa difraktometer neutron untuk pengukuran tegangan sisa DN1-M memiliki kapabilitas yang relatif sama dengan difraktometer neutron yang ada di negara-negara Eropa, sehingga data pengukuran tegangan sisa menggunakan DN1-M adalah *reliable* secara ilmiah.

5 Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Drs. Abarrul Ikram, PhD. dan Drs. Gunawan, MSc. atas dukungan teknisnya pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Mura T., *Micromechanics of Defects in Solids*, 1982, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, Netherlands.
- [2] Lodini, A., in *Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation* (Edited by M. E. Fitzpatrick and A. Lodini), Taylor and Francis, London, 2003.
- [3] ASTM E 837-89, Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole-Drilling Strain Gage Method, American Society for Testing and Materials, 1995.
- [4] Gugliano M., A Numerical Model to Investigate the Role of Residual Stresses on the Mechanical Behaviour of Al/Al₂O₃ Particulate Composite, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 7[2], 183-189 (1998).
- [5] Allen A. J., Hutchings M. T., and Windsor C. G., Neutron Diffraction Methods for Residual Stress Fields, *Advances in Physics*, 34[4], 445-473 (1985).
- [6] ISO/TTA 3 - VAMAS: Polycrystalline materials - Determination of residual stress by neutron diffraction.
- [7] Youtsos, A.G. and Ohms, C., European standardization activities on residual stress analysis by neutron diffraction, *Appl. Phys. A* 74 [Suppl.], S1716-S1718 (2002).
- [8] Webster, G.A., Neutron Diffraction Measurement of Residual Stress in a Shrink-fit Ring and Plug, VAMAS report no. 38, Jan. 2000.
- [9] Webster, G.A. and Wimpory, R.C., Development of procedures for the measurement of residual stress by neutron diffraction, *Appl. Phys. A* 74 [Suppl.], S1227-S1229 (2002).