PENGGUNAAN RADIASI *SYNCHROTRON* UNTUK PENGUKURAN DAERAH PLASTIS PADA MATERIAL BAJA KARBON

Yunan Prawoto
Laboratorium Uji Konstruksi (LUK-BPPTeknologi), Puspiptek Serpong Tangerang 15314

ABSTRAK

PENGGUNAAN RADIASI *SYNCHROTRON* UNTUK PENGUKURAN DAERAH PLASTIS PADA MATERIAL BAJA KARBON. Pada penelitian ini perubahan ukuran daerah plastis digunakan untuk verifikasi hasil analisis faktor intensitas tegangan dari retakan lelah yang dilakukan pada material yang memiliki tegangan sisa tarik. Daerah plastis vertikal digunakan untuk menyelidiki jejak faktor intensitas tegangan maksimum di dalam dan di luar daerah yang memiliki tegangan sisa tarik. Daerah plastis vertikal dideteksi dengan metoda *line broadening* dengan menggunakan radiasi *synchrotron* dengan ukuran spot 50 x 50 μm. Hasil pengukuran daerah plastis ini kemudian dibandingkan dengan hasil estimasi analitik. Hasil estimasi analitik ini didapatkan dengan menjumlahkan faktor intensitas tegangan kerja maksimum dan faktor intensitas tegangan sisa yang dihitung dengan metoda *weight function*. Ukuran daerah plastis terletak antara hasil analisis Rice dan Irwin. Juga dibandingkan dengan perhitungan menggunakan konstanta yang diperoleh dengan metoda micro hardness dan metoda etsa. Disimpulkan bahwa *line broadening* dari radiasi *synchrotron* dapat digunakan untuk mengukur daerah plastis yang terbentuk selama proses peretakan. Total maximum faktor intensitas tegangan adalah jumlah dari faktor intensitas tegangan kerja maksimum dan faktor intensitas tegangan sisa sesuai dengan prinsip superposisi.

Kata kunci : Faktor intensitas tegangan, daerah plastik, *weight function*, tegangan sisa tarik, *line broadening*, *radiasi synchrotron*

ABSTRACT

APPLICATIONS OF SYNCHROTRON RADIATION FOR PLASTIC ZONE INVESTIGATION OF CARBON STEEL MATERIALS. In this research the plastic zone size changes are used to verify an analysis of the stress intensity factors for a fatigue crack grown in a tensile residual stress field. The vertical extent of the plastic zone was used to investigate the history of the maximum stress intensity factors outside and inside a tensile residual stress field. The plastic zone was revealed by diffraction line broadening using a 50 x 50 μm synchrotron x-ray beam. The measured plastic zone size is compared to analytical estimates from the maximum stress intensity factor seen during crack growth. The maximum stress intensity factor during crack growth was obtained by summing the applied maximum stress intensity factor and the residual stress intensity factor computed from the residual stresses using the weight function method. The measured plastic zone sizes are laid between Rice's and Irwin's analytical solutions. They are also compared with the calculation results using the constants obtained by micro hardness and etching methods. It is concluded that diffraction line broadening from synchrotron radiation is capable of revealing the plastic zone formed during fatigue cracking and that the total maximum stress intensity factor is indeed the sum of the maximum applied and residual stress intensity factors.

Key words : Stress intensity factor, plastic zone, weight function, residual stress, line broadening, synchrotron radiation.

PENDAHULUAN

Dari penelitian-penelitian sebelumnya[1-4], diketahui bahwa tegangan sisa tarik meningkatkan laju cepat rambat retak, sedangkan tegangan sisa tekan bersifat sebaliknya, yaitu menurunkan laju cepat rambat retak. Dilain pihak, konsep faktor intensitas tegangan (FIT) telah terbukti efektif untuk menganalisa laju cepat rambat [5]. Rice telah membuktikan pada tahun 1967 bahwa FIT memiliki hubungan unik dengan ukuran daerah plastis pada ujung retakan [6]. Sehingga daerah plastis yang terbentuk pada ujung retakan dapat memberikan informasi tentang FIT efektif yang terjadi selama peretakan berlangsung. Pada penelitian ini, daerah plastis yang diukur secara eksperimen digunakan untuk verifikasi hasil analisis. Analisis tersebut dilakukan dengan prinsip superposisi dan metoda *weight function*.

Berbagai cara digunakan untuk mengukur daerah plastis secara experimen. Lankford et al. [7] melaporkan hasil pengukuran ukuran dan bentuk daerah plastis pada berbagai material dengan menggunakan metoda *electron channeling*. Metoda ini pada prinsipnya dilakukan

Vol. 1 No. 3, Juni 2000, hal : 15 - 20
ISSN : 1411-1098

dengan menggeser ke depan/ke belakang benda uji di dalam elektron mikroskop. Deformasi plastis menyebabkan degradasi yang sistematis pada hasil *electron channeling pattern*. Dengan metoda ini, mereka menemukan hubungan antara hasil pengujian dengan teori. Mereka juga menemukan bahwa bentuk daerah plastis tergantung pada jenis material. Dengan menggunakan metoda *laser speckle*, Tay et al. [8] menemukan hubungan yang beralasan antara teori dan percobaan pada material aluminium 2024-T351. Metoda ini berdasar pada perubahan kekasaran permukaan ketika suatu material mengalami deformasi plastis. Mereka menemukan bahwa daerah plastis secara praktek lebih kecil dari teori. Bathias dan Pelloux [9] menelusuri daerah plastis dengan menggunakan metoda *microhardness* pada material baja martensitik dan austenitik. Metoda ini berdasar pada perubahan nilai kekerasan karena deformasi plastis. Metoda etsa berhasil diterapkan oleh Hahn et al. [10,11]. Metoda yang lain juga digunakan dan didiskusikan secara rinci oleh beberapa peneliti lain. Diantaranya: *optical interference* [12], *x-ray line broadening* [13], dan rekristalisasi yang diikuti oleh etsa [14]. Metoda yang terakhir ini merupakan penyempurnaan metoda etsa. Uguz and Martin mendiskusikan 17 metoda yang berbeda dalam mengukur daerah plastis [15]. Semua metoda yang didiskusikan itu dilakukan pada benda uji dengan kondisi tegangan bidang, baik dengan benda uji tipis maupun dari permukaan benda uji.

TEORI

Banyak hasil pengujian maupun hasil analisis tentang daerah plastis telah dipublikasikan. Dari publikasi-publikasi tersebut, banyak juga yang dihubungkan dengan FIT [6, 9, 16, 17, 18]. Gambar 1 mengilustrasikan daerah plastis pada tegangan bidang dan regangan bidang yang dihitung dengan kriteria luluh von Mises. Dengan prinsip ini [19], batas daerah plastis tegangan bidang adalah :

$$r = C \cdot \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{YS}}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{3}{2}\sin^2\theta + \cos\frac{\theta}{2}\right) \quad \text{..... (1)}$$

sedangkan batas daerah plastis regangan bidang adalah

$$r = C \cdot \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{YS}}\right)^2 \cdot \left(\frac{3}{2}\sin^2\theta + (1-2\nu)^2(1+\cos\theta)\right) \quad \text{..... (2)}$$

Dengan berdasarkan pada kriteria luluh Tresca [19], batas daerah plastis tegangan bidang adalah

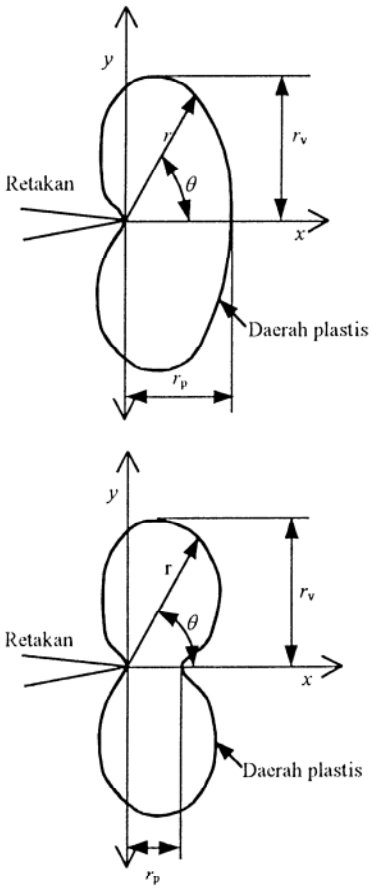
$$r = C \cdot \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{YS}}\right)^2 \cdot \left(\cos\frac{\theta}{2}\left(1+\sin\frac{\theta}{2}\right)\right)^2 \quad \text{..... (3)}$$

dan batas daerah plastis regangan bidang adalah yang lebih besar dari:

$$r = C \cdot \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{YS}}\right)^2 \cdot \cos^2\frac{\theta}{2}\left[1-2\nu+\sin\frac{\theta}{2}\right]^2 \text{ ,dan}$$

$$r = C \cdot \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{YS}}\right)^2 \cdot \sin^2\theta \quad \text{..... (4)}$$

Pada persamaan (1)-(4), K_{max} adalah FIT maksimum yang



Gambar 1. Batas daerah plastis sebagai fungsi θ.
(a). menunjukkan kondisi tegangan bidang,
(b). menunjukkan kondisi regangan bidang.

dialami selama proses retak lelah, σ_{YS} adalah tegangan luluh, ν adalah rasio Poisson, dan C adalah konstanta

Tabel 1. Besar vertikal dan horizontal PZ dengan menggunakan kriteria luluh von Mises and Tresca.

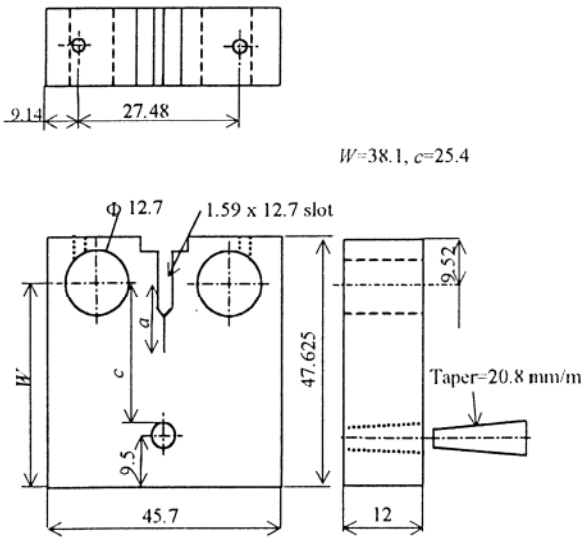
		Horizontal, r_p	Vertikal, r_v	r_v/r_p
von Mises	Tegangan bidang	$1 \cdot 2C\left(\frac{K}{\sigma_{YS}}\right)^2$	$1{,}6 \cdot 2C\left(\frac{K}{\sigma_{YS}}\right)^2$	1.6
	Regangan bidang	$0{,}16 \cdot 2C\left(\frac{K}{\sigma_{YS}}\right)^2$	$0{,}8 \cdot 2C\left(\frac{K}{\sigma_{YS}}\right)^2$	5
Tresca	Tegangan bidang	$1 \cdot 2C\left(\frac{K}{\sigma_{YS}}\right)^2$	$1{,}5 \cdot 2C\left(\frac{K}{\sigma_{YS}}\right)^2$	1.5
I	Regangan bidang	$0{,}16 \cdot 2C\left(\frac{K}{\sigma_{YS}}\right)^2$	$1 \cdot 2C\left(\frac{K}{\sigma_{YS}}\right)^2$	6.25

yang tergantung pada jenis material. Pada umumnya, material dengan daktilitas tinggi memiliki nilai C yang tinggi pula.

Tabel 1 merangkum persamaan (1)-(4). Tabel tersebut memberikan perbandingan antara ukuran daerah plastis secara horizontal dan vertikal. Tabel ini memungkinkan untuk diadakannya pembandingan hasil percobaan dengan hasil-hasil yang telah dipublikasikan sebelumnya [6, 9, 16-18].

Pada proses retak lelah, perkembangan retakan akan merusak daerah plastis horizontal. Namun, daerah plastis vertikal akan tetap tertinggal dan dapat diamati. Selama proses pelelahan berlangsung, daerah plastis siklis akan selalu dibarengi dengan daerah plastis monotonik. Telah diketahui bahwa daerah plastis monotonic berhubungan secara langsung dengan FIT maksinum K_{max}, sedangkan daerah plastis siklis lebih berhubungan dengan selisih FIT ΔK [6, 20]. Pada umumnya, percobaan retak lelah menggunakan rasio beban positif, biasanya antara 0,1 s/d 0,5. Dengan kondisi ini, ukuran daerah plastis siklis adalah sekitar 80% s/d 25% dari daerah plastis monotonik. Namun demikian kebanyakan peneliti melaporkan tentang sukarnya mengukur daerah plastis siklis [15]. Alasan utama sukarnya menentukan daerah plastis siklis adalah karena ukurannya yang kecil dan miripnya karakteristik daerah plastis siklis dengan daerah plastis monotonik. Dengan metoda yang tersedia, batas antara daerah plastis siklis/ monotonik tidak sejelas batas antara daerah plastis siklis dan *elastic zone*. Hal ini menyebabkan sangat sulitnya pembedaan antara daerah plastis siklis/monotonik.

Pada penelitian ini yang dibutuhkan hanyalah daerah plastis monotonik karena itulah yang berhubungan secara langsung dengan FIT maksimum. Besar daerah plastis vertikal digunakan untuk verifikasi total-FIT maksimum pada retakan yang dilakukan pada material yang memiliki tegangan sisa.



Gambar 2. Ukuran benda uji ASTM CT *specimen*

TATA KERJA

Benda Uji dan Pengujian Retak Lelah

Benda uji yang digunakan adalah benda uji ASTM *compact tension* (*CT-specimen*) [21] dengan material baja 1080, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Baja ini kemudian *dispheroidisasi* dengan memanaskan pada 800° C selama 3 jam dan kemudian didinginkan di udara. Ukuran butiran ferrite sekitar 5 μm, sedangkan partikel cementite memiliki ukuran 1 μm. Tegangan sisa diberikan dengan menekan suatu *oversized tapered pin* kedalam suatu lubang dengan 1,9 % *misfit strain* secara hidraulis.

Peretakan awal dilakukan dengan perangkat lunak[22] sehingga dapat dikontrol. Panjang retakan retakan awal kira-kira 8,6 mm dibutuhkan sebelum pengujian yang sebenarnya dapat dilakukan. Frekwensi yang digunakan adalah 4 Hz sinusoidal. Proses peretakan dilakukan dengan *selisih FIT kerja konstan* sebesar 25 MPa√m dan *rasio pembebanan konstan* 0,1. Panjang retakan diukur dengan menggunakan *double-cantilever clip-in displacement gage* (clip gage) yang dipasang pada mulut benda uji sesuai dengan saran standar ASTM [21]. Panjang retakan juga diamati secara cermat dengan menggunakan *traveling microscope*.

Pengukuran Tegangan Sisa Awal

Pengukuran tegangan sisa awal dilakukan dengan difraksi sinar X di Northwestern University [23]. Sumber *rotating anode* digunakan dengan karakteristik chromium dengan panjang gelombang 2,2897 Å. Sinar X difokuskan dengan *tapered glass capillary tube* pada benda uji. Ukuran spot pada permukaan benda uji adalah 210 μm. Komponen tegangan yang diukur adalah yang tegak lurus terhadap arah retakan dan tegak lurus dengan permukaan retakan

Pengukuran Daerah plastis

Karena tebalnya benda uji, fenomena retakan didominasi oleh regangan bidang, sehingga *daerah plastis* didalam benda uji merupakan yang hal paling menarik untuk diamati. Benda uji dipotong secara memanjang dengan *abrasive wheel* yang didinginkan dengan air. Ini memungkinkan dilakukannya akses terhadap *daerah plastis* terhadap obyek di dalam material. Untuk menghilangkan kerusakan material yang disebabkan oleh proses pemotongan, benda uji kemudian dipreparasi *metallography* yaitu *dipolish* and dietsa. Untuk *polishing* terakhir digunakan 0,05 μm alumina *powder*, sedangkan etsa menggunakan 2 % nital.

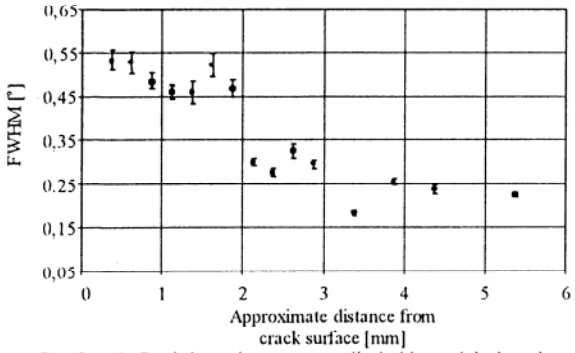
Daerah plastis diukur dengan *beam* sinar X dengan metoda *peak broadening*. Percobaan dilakukan di *beam line BM-1* di *Advanced Photon Source* di *Argonne National Laboratory-USA*. Sinar memiliki energy 10 keV dengan ukuran spot 50 x 50 μm, puncak

Vol. 1 No. 3, Juni 2000, hal : 15 - 20
ISSN : 1411-1098

yang digunakan diambil dari ferrite 411 dengan sudut difraksi 2θ sebesar 133°.

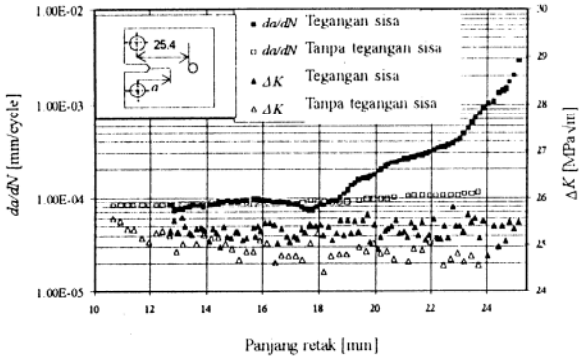
Pengujian dimulai dengan mencari posisi permukaan retakan. Ini dilakukan dengan menempatkan *fluorescent screen*. Posisi dimana *fluorescence* mencapai setengah dari nilai penuhnya dinyatakan sebagai permukaan retakan.

Setelah permukaan retakan diketemukan, puncak difraksi pada beberapa lokasi yang berjarak tertentu



Gambar 3. *Peak broadening* yang disebabkan oleh daerah plastis. Data ini diambil dari benda uji dengan panjang retak a=21,5 mm di dalam benda uji. Terlihat daerah plastis berjarak 3 mm dari permukaan retakan.

direkam. Di sekitar permukaan retakan, akan terjadi *peak broadening* karena deformasi plastis. Puncak difraksi didekati dengan fungsi *Gaussian* dengan *linear background* untuk menentukan *full width at half maximum (FWHM)*. Gambar 3 menunjukkan contoh hasil percobaan. Posisi dimana FWHM kembali ke nilai asalnya dinyatakan sebagai batas *daerah plastis*.



Gambar 4. Perbandingan cepat rambat retak pada benda uji tanpa tegangan sisa dan dengan tegangan sisa. Walaupun selisih FIT kerja (25 MPa√m) sama, kecepatan mereka menjadi berbeda setelah retakan mencapai daerah yang memiliki tegangan sisa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perambatan Retak Lelah

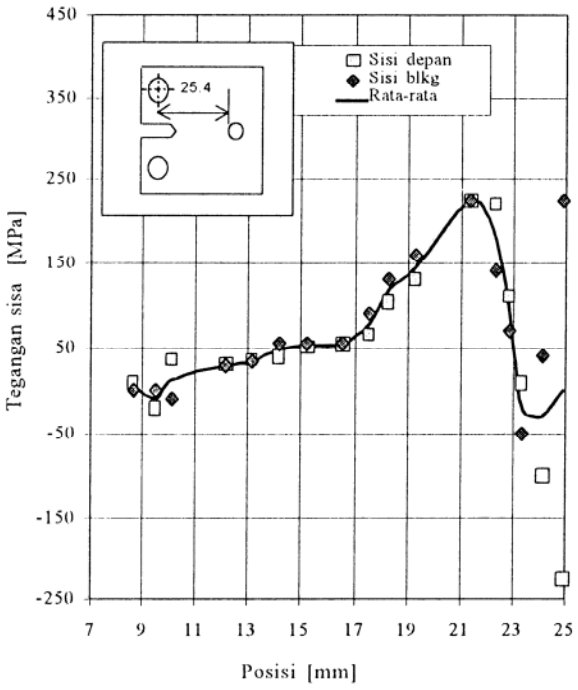
Gambar 4 menunjukkan perbandingan cepat rambat retak pada benda uji dengan dan tanpa tegangan sisa. Percobaan dilakukan dengan selisih FIT kerja konstans 25 MPa√m. Terlihat bahwa cepat rambat retak dipercepat secara signifikan oleh adanya tegangan sisa.

Tegangan Sisa dan Daerah Plastis

Gambar 5 menunjukkan tegangan sisa awal. Tegangan sisa awal adalah tegangan sisa pada material sebelum dilakukan pengujian retak lelah. Di sekitar pin, ada sedikit perbedaan tegangan sisa antara bagian depan dan bagian belakang. Hal ini dibahas di publikasi lain, dengan elemen hingga [24]. Gambar 6 menunjukkan daerah plastis vertikal. Data menunjukkan bahwa semakin retakan mendekati pin, besar daerah plastis juga bertambah.

Superposisi

Tegangan sisa dikonversikan ke FIT sisa dengan

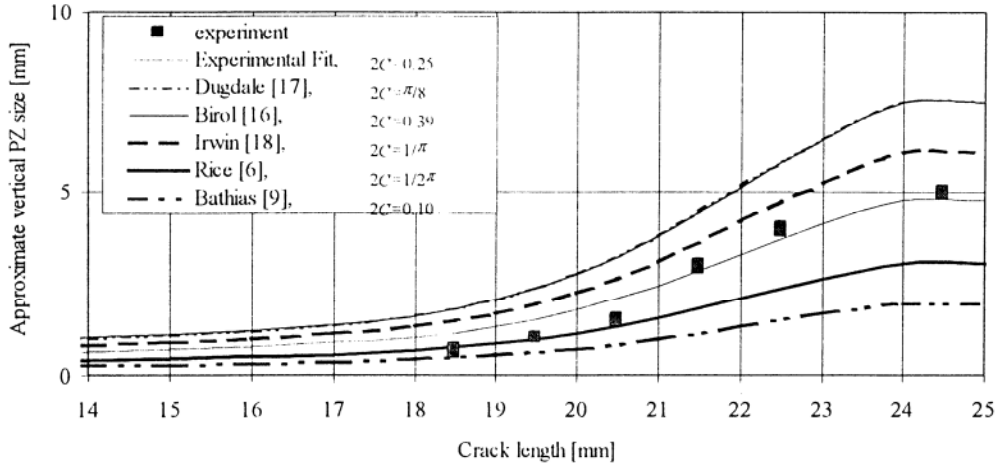


Gambar 5. Tegangan sisa awal sepanjang garis calon retakan (*prospective crack line*).

menggunakan *weight function* [25, 26, 27]

$$K_R = \int_0^a \sigma(x) \cdot m(a,x) dx \quad \text{..... (5)}$$

Di sini, *weight function m(a,x)* hanya tergantung pada bentuk dan ukuran suatu komponen. Kurva pada Gambar 5 adalah rata-rata tegangan sisa yang digunakan pada persamaan (5) untuk menghitung *FIT sisa*. Gambar 7 menunjukkan hasil perhitungan dengan tiga hasil analitik dari 3 *weight function* yang berbeda [25, 26, 27].



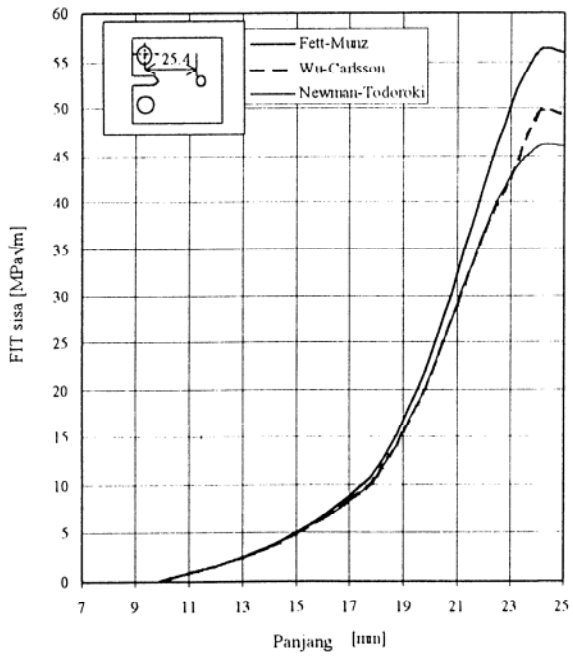
Gambar 6. Daerah plastis vertical diukur dari permukaan retakan. Hasil pengujian dibandingkan dengan beberapa hasil analisis.

Tidak diketemukan perbedaan yang signifikan.

Pendekatan dengan menggunakan *linear elastic fracture mechanics* sangat mudah dilakukan, karena setelah tegangan diubah menjadi FIT, penambahan dan pengurangan terhadapnya dapat dilakukan sesuai prinsip superposisi. Untuk benda uji yang tidak memiliki tegangan sisa, FIT maksimum sama untuk semua posisi

$$K_{max} = \frac{\Delta K}{(1-R)} \quad \text{..... (6)}$$

Untuk selisih FIT kerja konstan ΔK=25 MPa√m dan rasio beban R=0,1 K_{max} adalah 27,78 MPa√m. Di lain pihak, untuk benda uji yang memiliki tegangan sisa, FIT maksimum akan berubah karena prinsip superposisi harus diterapkan



Gambar 7. Faktor intensitas tegangan yang dihitung dari tegangan sisa dengan 3 solusi *weight function*.

$$K_{max} = K_R + \frac{\Delta K}{(1-R)} \quad \text{..... (7)}$$

Dimana K_R adalah FIT sisa yang ditunjukkan pada Gambar 7. Sehingga FIT sisa, K_{max} juga akan bertambah, yang seterusnya menyebabkan bertambah besarnya daerah plastis.

Gambar 6 dapat dijelaskan dengan analisi berikut. Walaupun benda uji mengalami FIT kerja konstan, besar daerah plastis diketemukan meningkat. Total FIT adalah FIT sisa ditambahkan dengan FIT kerja seperti ditunjukkan pada persamaan (7). Pada Gambar 6, hasil percobaan dibandingkan dengan hasil perhitungan. Dalam perhitungan, digunakan beberapa konstanta, $2C$ pada persamaan (1)-(4), yang diperoleh secara analitik maupun dengan percobaan [9, 16, 17, 18]. Untuk itu digunakan Tabel 1 dan Tabel 2. Kedua tabel ini memungkinkan kita untuk membuat perbandingan secara langsung terhadap konstanta-konstanta yang dipublikasikan terdahulu. Data percobaan ini menunjukkan bahwa $2C = 0{,}25$. Nilai ini dapat dibandingkan langsung dengan tabel 2, yaitu antara Rice-$2C$, $1/2\,\pi \approx 0{,}159$, dan Irwin-2C, $1/\pi \approx 0{,}318$.

Tabel 2. Konstanta yang digunakan untuk membandingkan daerah plastis.

Peneliti:	Rice [6]	Irwin [18]	Dugdale [17]	Birol [16]	Bathias [9]
Konstanta:	$1/2\pi$	$1/\pi$	$\pi/8$	0.39	0.10

Catatan : Konstanta-konstanta ini adalah $2C$ pada persamaan (1)-(4)

KESIMPULAN

Telah dibuktikan bahwa radiasi synchrotron dengan metoda *peak broadening* dapat digunakan untuk

Vol. 1 No. 3, Juni 2000, hal : 15 - 20
ISSN : 1411-1098

mengukur besar daerah plastis. Juga telah dibuktikan bahwa prinsip superposisi dapat dibuktikan secara experimen. Besar daerah plastis terletak antara hasil analitik Rice dan Irwin. Ini membuktikan bahwa nilai daerah plastis yang diukur dalam percobaan ini adalah benar mengingat analisis Rice berdasarkan pada daerah tegangan elastis dan Irwin berdasar pada analisa elastis-plastis sempurna.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas bimbingan professor Winholtz dari University of Missouri dalam melakukan riset ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih pada Dr. Almer atas pemberian data tegangan sisa. Pengujian dengan APS didukung oleh U.S Department of Energy, Basic Energy Sciences, Office of Science, dibawah kontrak No. W-31-109-Eng-38. Asistensi dalam pengukuran ini dilakukan oleh Dr. Haeffner dan Dr. Lee, dari Argonne-Illinois.

DAFTAR ACUAN

[1] J.H. UNDERWOOD, "Experimental Mechanics", March 1995, p. 61-65.

[2] J.H. UNDERWOOD, L. P. POOK, and J.K. SHARPLES, *Flaw Growth and Fracture*, STP 631, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1977) p. 402-415.

[3] D. V. NELSON, *Residual Stress Effects in Fatigue*, STP 776, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1982) p. 172-194.

[4] A. P. PARKER, *Residual Stress Effects in Fatigue*, STP 776, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1982) p. 13-31.

[5] H. P. ROSSMANITH, *Fracture Research in Retrospect,* An Anniversary Volume in Honour of G.R. Irwin's 90th Birthday, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam-Netherland, (1997).

[6] J.R. RICE, *Fatigue Crack Propagation*, STP 415, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1967) p. 247-309.

[7] J. LANKFORD, D.L. DAVIDSON, and T.S. COOK, in: "Cyclic Stress-Strain and Plastic Deformation Aspects of Fatigue Crack Growth", STP 637, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1977) p. 36-55.

[8] T.E. TAY, C.M. YAP, and C.J. TAY, *Engineering Fracture Mechanics*, **52**, 5 (1995) 879.

[9] C. BATHIAS and R. M. PELLOUX, *Metallurgical Transactions*, **4** (1973) 1265.

[10] G. T. HAHN, P. N. MINCHER and A. R. ROSENFIELD, *Experimental Mechancis*, (1971) 248.

[11] G. T. HAHN, R. G. HOAGLAND, and A. R. ROSENFIELD, *Metallurgical Transactions*, **3** (1972) 1189.

[12] G.R. CHANANI, *International Journal of Fracture*, **13** (1977) 394.

[13] W.H. SCHLOSBERG and J.B. COHEN, *Metallurgical Transactions A*, **13A** (1982) 1987.

[14] E. TSHEGG, C. FALTIN, and S. STANZL, *Journal of Materials Science*, **15** (1980) 131.

[15] A. UGUZ and J.W. MARTIN, *Materials Characterization*, **37** (1996) 105.

[16] Y. BIROL, *Journal of Materials Science*, 23 (1988) 2079.

[17] D.S. DUGDALE, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, **8** (1960) 100.

[18] G.R. IRWIN, *Proceeding of Seventh Sagamore Ordance Materials Conference*, Syracuse University, 1960, p.63-78.

[19] D. BROEK, *Elementary engineering fracture mechanics*, 4th edition", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Netherland, (1996).

[20] A. SAXENA and C.L. MUHLSTEIN, *Fatigue crack growth testing* in: ASM Handbook Vol. 19-Fatigue and Fracture, ASM International, Materials Park, OH, 1996, p. 168-184.

[21] Standard Test Methods for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM Designation E 647-95a, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1995, p 565-601.

[22] 759.40 Testware fatigue crack growth test operator's guide, MTS Systems Corporation, Eden Prairie, 1993.

[23] J. D. ALMER, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **29A** (1998) 2127.

[24] J.D. ALMER, J.B. COHEN, K.R. MCCALLUM, and R.A. WINHOLTZ, in: T. Erricson and M. Oden (Eds.), *Proceedings of the Fifth International Conference on Tegangan Sisa*", Soc. Exp. Mech., Bethel, CT, 1997, p.1072-1077.

[25] A. TODOROKI and H. KOBAYASHI, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*", series A, **54 (1988)** 30-36.

[26] X. R. WU and A. J. CARLSSON, *Weight functions and faktor intensitas tegangan solutions*, Pergamon Press, Oxford-UK, (1991).

[27] T. FETT and D. MUNZ, *Faktor intensitas tegangans and Weight Functions*, Computational mechanics publications, Southampton-UK, (1997).