

PERAMBATAN RETAK FATIK TARIK DINAMIS PADA PIPA BAJA KARBON RENDAH

Udur 1 Januari Hutabarat

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan

Jl. Almamater No.1 Kampus USU Medan 20155

Email: udur.htbarat@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik laju perambatan retak fatik tarik dinamis pipa baja karbon rendah. Spesimen yang dilakukan adalah pipa baja karbon rendah dengan komposisi kimianya terdiri dari 99,51% Fe - 0,047% C - 0,308% Mn dan unsur lainnya, seperti Cr, Al dan S. Pada setiap spesimen dibuat retak awal di tengah-tengah spesimen dengan variasi sudut retak 0° , 15° , 30° dan 45° terhadap bidang normalnya. Pengujian lain yang dilakukan untuk mendukung penelitian ini adalah pengamatan struktur mikro dan makro.

Pengujian laju perambatan retak fatik dilakukan dengan mesin servopulser. Pertambahan rambat retak diamati dengan menggunakan *traveling microscope* dengan pembesaran 20x. Pengolahan data panjang retak rata-rata dan jumlah siklus dilakukan dengan metoda inkremental, sesuai dengan standard ASTM untuk memperoleh kurva laju perambatan retak (da/dN vs ΔK).

Hasil penelitian diperoleh bahwa laju perambatan retak fatik tarik dinamis yang dilakukan mulai dari spesimen sudut retak 0° , 15° , 30° dan 45° menunjukkan bahwa laju perambatan retak fatik terhadap bidang normal retak awal (*mode I*) mengalami penurunan yang signifikan yaitu 8,75%, kemudian laju perambatan retak fatik terhadap bidang gesernya (*mode II*) mengalami peningkatan yaitu 8,29% sedangkan terhadap *mixed mode* laju perambatan retak menurun hingga 8,75%. Berdasarkan bentuk penampang patahan, pengujian tarik dinamis memberikan pola yang sama dalam pembentukan retak awal, pola perambatan retak dan pola patah.

Kata kunci : pipa baja karbon rendah, perambatan retak fatik, *mode I/II* dan *mixed mode*

Abstract

This study aims to determine the characteristics of the rate of fatigue crack propagation dynamic tensile carbon steel pipe. Specimens taken is low carbon steel pipes with a chemical composition consisting of 99.51% Fe - C 0.047% - 0.308% Mn and other elements, such as Cr, Al and S. In each specimen was made the initial crack in the middle of the specimen with variations corner crack 0° , 15° , 30° and 45° of the normal field. Other testing is done to support this research is observation of micro and macro structures.

The rate of fatigue crack propagation testing done with machines servopulser. Added propagation of cracks was observed using a traveling microscope with 20x magnification. Data processing is the average crack length and the number of cycles performed by the incremental method, in accordance with ASTM standard curve to obtain the crack propagation rate (da / dN versus ΔK).

The result showed that the rate of fatigue crack propagation dynamic tensile specimens made from cracked corner 0° , 15° , 30° and 45° indicate that the rate of fatigue crack propagation normal to the plane of crack initiation (*mode I*) decreased significantly by 8.75%, then the rate of fatigue crack propagation to the plane shear (*mode II*) has risen 8.29%, while for mixed mode crack propagation rate decreases to 8.75%. Based on the cross-sectional shape of the fault, dynamic tensile test gave the same pattern in the formation of crack initiation, crack propagation patterns and patterns of fracture.

Keywords: low carbon steel pipe, fatigue crack propagation, mode I / II and mixed mode

1. PENDAHULUAN

Pada umumnya komponen konstruksi mesin yang mengalami pembebanan dinamis akan mengalami tegangan seperti tegangan tarik, geser, puntir maupun kombinasinya. Tegangan tersebut umumnya bekerja secara berfluktuasi, jika fluktuasi tegangan ini cukup besar dan berulang-ulang, kegagalan struktur dapat terjadi walaupun tegangan maksimum yang terjadi pada elemen tersebut lebih kecil dibandingkan dengan kekuatan materialnya. Kegagalan ini dikatakan sebagai fatik atau kelelahan.

Kegagalan fatik akan merambat menjadi retak seiring dengan pertambahan waktu dan siklus kerja. Dalam komponen struktur, retak juga dapat disebabkan oleh cacat bawaan atau takik akibat proses fabrikasi, sehingga dapat menimbulkan konsentrasi tegangan yang cukup tinggi. Apabila komponen bekerja pada beban yang berfluktuasi maka inisiasi retak dapat terjadi walaupun pada bahan yang ulet sekalipun. Dalam mekanika perpatahan retak fatik akibat pembebanan dinamis, dikenal dengan tiga pola pembebanan yaitu, pola pembebanan normal terhadap retak (*Mode I*), pola pembebanan geser terhadap retak (*Mode II*) dan pola pembebanan menyobek retak (*Mode III*).

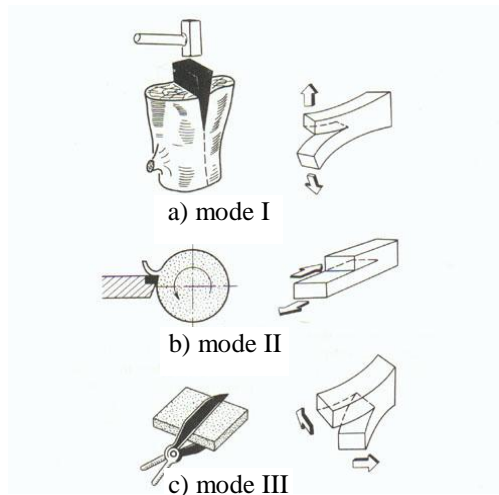
Berdasarkan hal-hal tersebut diatas, maka analisis laju perambatan retak khususnya retak fatik sangat perlu dilakukan. Suatu fenomena yang menarik yaitu perambatan retak fatik akibat pembebanan dinamis seperti pembebanan tarik dinamis dan puntir dinamis. Fenomena ini akan dipelajari pada spesimen pipa yang disimulasikan berupa takik tajam pada bagian sisi tengah spesimen dengan berbagai variasi sudut retak, masing-masing spesimen membentuk sudut retak awal yaitu sudut 0° , 15° , 30° dan 45° terhadap bidang normal. Kemudian dilakukan pengujian dengan pembebanan tarik dinamis pada beban konstan.

Dalam penelitian ini pipa baja karbon rendah dipakai sebagai obyek pengamatan untuk menganalisis laju perambatan retak. Mengingat pipa baja karbon rendah sangat luas digunakan dalam berbagai perancangan, misalnya untuk konstruksi mesin dan industri, terutama untuk komponen sistem perpipaan.

Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan atau bahan pertimbangan dalam menentukan laju perambatan retak fatik pada pipa yang mempunyai jenis bahan yang sama dengan penelitian ini. Pada akhirnya penelitian ini diharapkan dapat menambah khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi, serta kemajuan industri terutama dibidang perancangan komponen yang mengalami pembebanan dinamis.

Dalam mekanika perpatahan pertumbuhan retak akibat pembebanan dinamis dapat digambarkan dalam tiga kasus (gambar 1) yaitu :

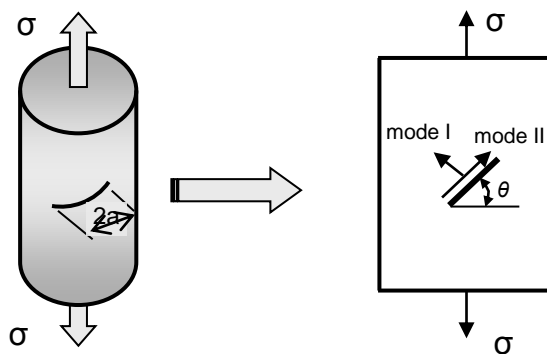
- Pembebanan normal terhadap retak disebut *crack opening mode* atau *mode I*, dimana permukaan retak langsung membuka lebar, biasanya diderita oleh bahan yang mengalami tegangan tarik.
- Pembebanan geser disebut *in-plane siliding mode* atau *mode II*, dimana permukaan-permukaan retakan saling meluncur terhadap yang lainnya dengan arah tegak lurus tepi takik retakan.
- Pembebanan menyobek retak disebut *anti-plane shearing mode* atau *mode III*, pembebanan retak mirip sobekan karena permukaan-permukaan retakan bergeser terhadap lainnya dalam arah sejajar tepi takik retakan.



Gambar 1. Pembebanan *mode I,II* dan *III*

Analisis *Mixed Mode* pada Ujung Retak

Dalam prakteknya sering dijumpai dua pola pembebanan yang terjadi bersamaan yaitu *mode I* dan *II*. Hal ini terjadi pada saat pembebanan tarik dinamis maupun pembebanan puntir dinamis seperti pada gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Analisis retak pada pembebanan tarik dinamis

Dari gambar diatas diperoleh persamaan K_I dan K_{II} adalah sebagai berikut :

$$K = \sigma (\pi a)^{1/2}$$

Maka,

$$\Delta K_I = \sigma \cos^2 \theta \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots 1$$

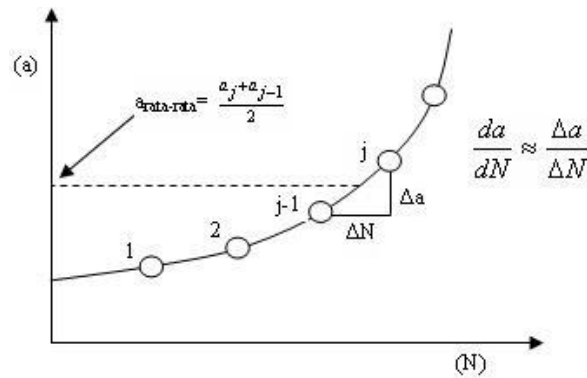
$$\Delta K_{II} = \sigma \sin \theta \cos \theta \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots 2$$

sehingga,

$$K_{eq,tarik} = [\Delta K_I^2 + \Delta K_{II}^2]^{1/2} \dots\dots\dots 3$$

Laju Perambatan Retak Fatik

Kurva panjang retak (a) vs data siklus (N) pada gambar 4 dibawah ini dapat digunakan sebagai dasar pendekatan untuk menentukan laju perambatan retak fatik. Jika kurva tersebut dibagi menjadi beberapa interfal dan untuk setiap interfalnya diberi penomoran 1, 2, 3, ...,j, maka laju perambatan retak sampai titik ke-j dapat ditentukan sebagai berikut :



Gambar 3. Kurva laju pertumbuhan retak (Dowling, 1987)

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_j \approx \left(\frac{\Delta a}{\Delta N}\right)_j = \frac{a_j - a_{j-1}}{N_j - N_{j-1}} \dots\dots\dots 7$$

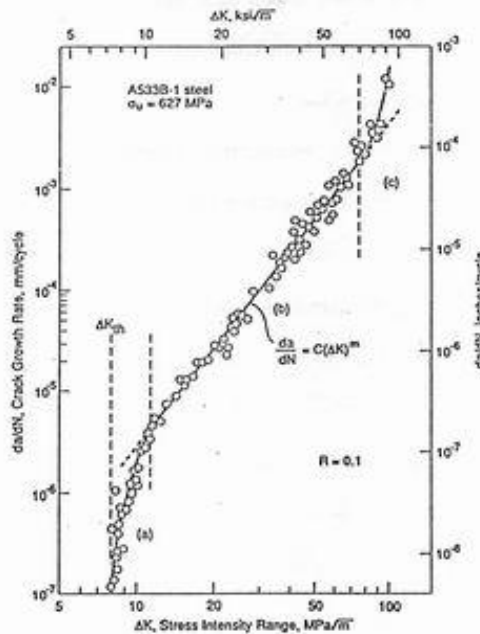
Korelasi antara karakteristik perambatan retak dengan konsep LEFM (*Linier Elastic Fracture Mechanics*), biasanya diberikan dalam bentuk kurva log-log (kurva sinusoidal) da/dN vs ΔK , dengan,

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots 8$$

Atau,

$$\Delta K = \Delta\tau \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots 9$$

Laju perambatan retak, da/dN , sebagai fungsi ΔK dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Kurva perambatan retak da/dN vs ΔK (skala log-log) (Rolfe,1977)

Kurva diatas mempunyai bentuk “sinusoidal” yang dapat dibagi menjadi 3 daerah yaitu, daerah I (*region I*) disebut daerah ambang fatik yang terjadi pada laju perambatan retak sekitar 10^{-10} m/siklus, dibawah laju ini tidak terjadi laju perambatan retak. Daerah II (*region II*) menunjukkan suatu hubungan linier antara $\log da/dN$ dan $\log \Delta K$, sedangkan untuk daerah III (*region III*), terjadi laju perambatan retak berlangsung sangat cepat sehingga sulit dikontrol, biasanya daerah ini jarang digunakan untuk persoalan perambatan retak fatik.

Paris (1963) dalam buku *Metal Fatigue in Engineering* menyatakan bahwa pada daerah II, retak merambat secara linier, sehingga daerah ini dipakai dalam pertimbangan perancangan struktur dan untuk memprediksi umur perambatan retak fatik.

2. METODOLOGI

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah pipa baja karbon rendah yang mempunyai komposisi kimia : C 0,0476 %, Mn 0,3089 %, Fe 99,51 % dan Al 0,0567%. Dari data komposisi kimia diatas, terlihat kandungan unsur C sebesar 0,0476 %, besar kemungkinan hasil pengujian komposisi ini memberikan hasil yang kurang sesuai dengan harga sesungguhnya. Untuk itu dilakukan pengoreksian harga kandungan unsur C ini dengan membandingkan terhadap hasil pengujian struktur mikro yang dilakukan terhadap material yang sama.

Spesimen uji perambatan retak fatik tarik dinamis dan puntir dimanis dibuat dengan menggunakan mesin potong EDM (*Electric Discharge Machine*). Retak awal (2a) pada spesimen uji dibuat sepanjang 11 mm dan terletak ditengah-tengah dengan variasi yaitu 0° , 15° , 30° dan 45° terhadap bidang normal.

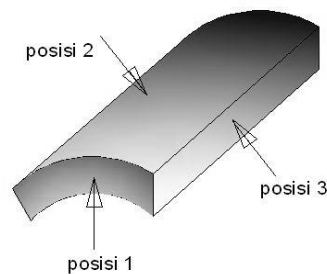
Peralatan yang digunakan untuk pelaksanaan pengujian adalah sebagai berikut : mesin uji universal servohydraulic merk Shimadzu type EHF-EB20-40L, untuk pengujian perambatan retak fatik dengan pembebanan tarik dinamis dan traveling microscope untuk mengamati rambat retak.

Analisis dilakukan setelah diperoleh data-data dari hasil pengujian berupa perambatan retak dan jumlah siklus kemudian dibuat dalam bentuk grafik panjang retak (a) terhadap jumlah siklus (N) dan grafik antara perubahan faktor intensitas tegangan (ΔK) terhadap laju perambatan retak (da/dN). Hasil perhitungan ΔK dan da/dN selanjutnya diolah dengan metoda inkremental yang direkomendasikan oleh ASTM, kemudian dibuat dalam grafik yang dipilih pada daerah linier yang diasumsikan sebagai daerah perambatan retak stabil sesuai dengan persamaan konstanta Paris.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

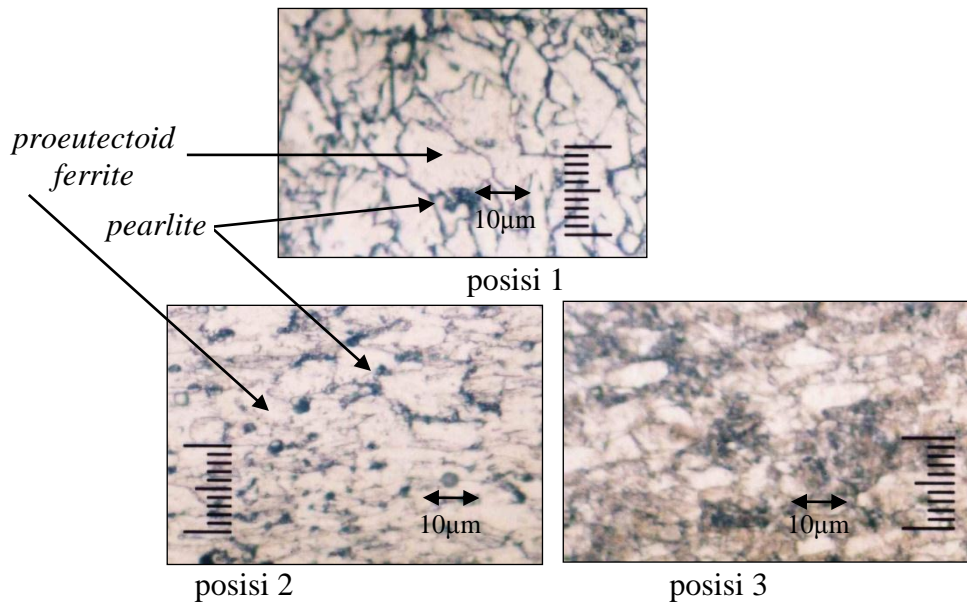
Pengujian Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro baja karbon rendah yang digunakan dalam penelitian ditampilkan pada gambar 5-6. Untuk mendapatkan data kandungan unsur C dalam material spesimen dengan tepat, data dari hasil pengujian komposisi kimia dibandingkan dengan hasil pengujian struktur mikro.



Gambar 5. Posisi pengujian struktur mikro

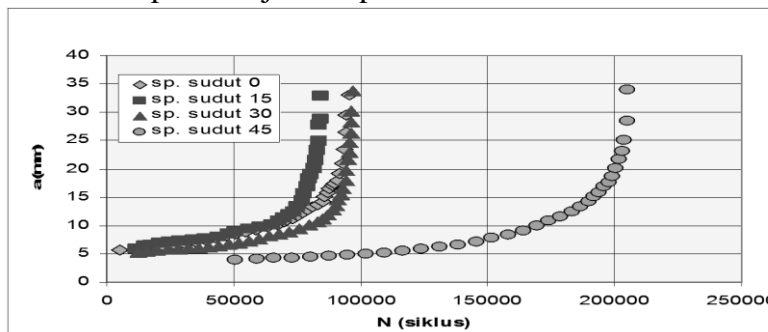
Berdasarkan analisa gambar struktur mikro dibawah ini, material spesimen terdiri dari fasa *proeutectoid ferrite* (sebagai fasa yang dominan) dan fasa *pearlite*. Harga kandungan unsur C dapat diperoleh dari harga perbandingan antara fasa *pearlite* terhadap fasa totalnya yang diperkirakan besarnya mendekati 0,047%, sesuai dengan data hasil pengujian komposisi kimia.



Gambar 6. Hasil pengujian struktur mikro pipa baja karbon rendah

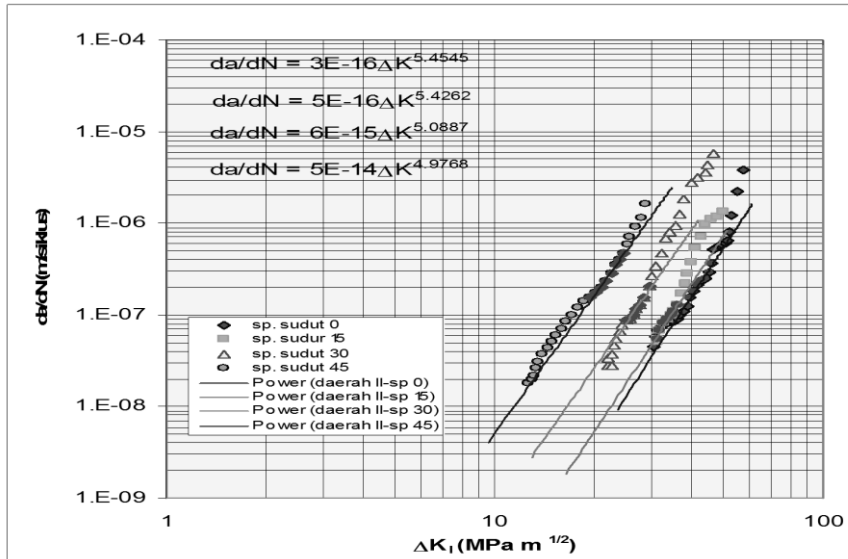
Pengujian laju perambatan retak dengan pembebanan tarik dinamis

Pengujian laju perambatan retak ini dilakukan dengan fluktuasi beban konstan pada *stress ratio* (R) 0,3 dengan frekuensi 3-8 Hz. Laju perambatan retak fatik diperoleh dengan mencatat jumlah siklus (N) tiap pertambahan panjang retak (a) \pm 0,25 mm menggunakan *optical travelling microscope* dengan pembesaran 20x. Pencatatan data dilakukan pada sisi kiri dan kanan retak awal kemudian kedua panjang retak tersebut dijumlahkan dan dibagi 2. Data tersebut diplot dalam bentuk kurva a vs N dan kurva da/dN vs ΔK dengan menggunakan metode polinomial inkremental (*incremental polynomial method*). Pengolahan data dilakukan dengan *microsoft excell*. Hasil lengkap pengolahan data dapat ditunjukkan pada halaman berikut:

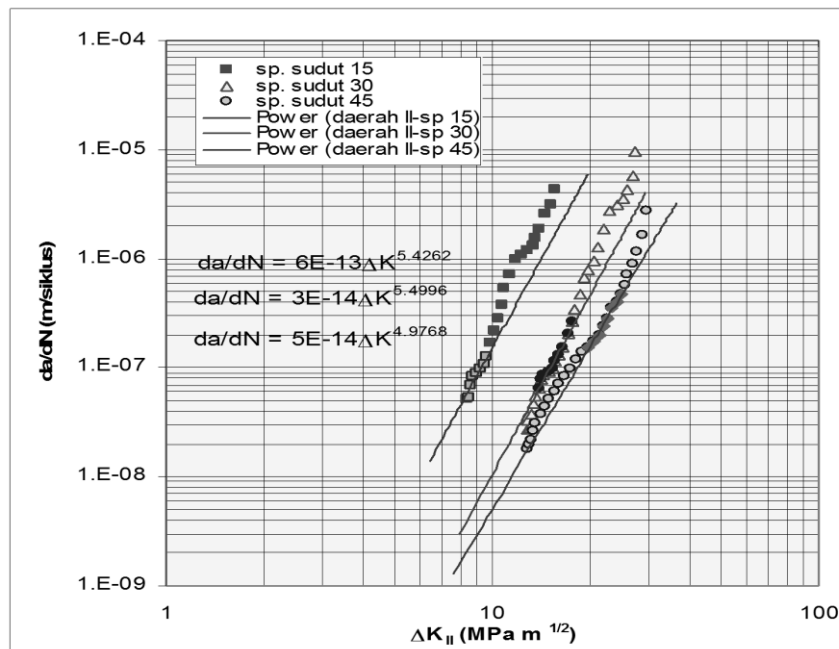


Gambar 7. Kurva a vs N pada pengujian tarik dinamis

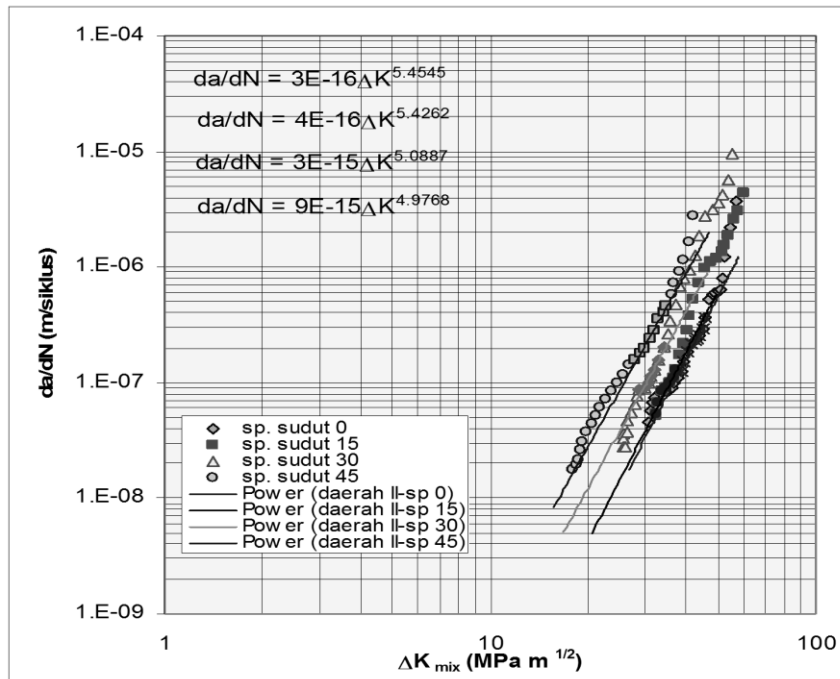
Untuk memprediksi laju perambatan retak dibuat grafik skala log-log agar hubungan antara laju perambatan retak dengan perubahan faktor intensitas tegangan menjadi linier yang terjadi pada daerah II. seperti pada gambar 8-9.



Gambar 8. Kurva da/dN vs ΔK untuk *Mode I* tarik dinamis



Gambar 9. Kurva da/dN vs ΔK untuk *Mode II* tarik dinamis



Gambar 10. Kurva da/dN vs ΔK untuk *mixed mode* tarik dinamis

Pada beban yang sama, harga A dan n tergantung dari harga R, tetapi tidak tergantung dari besar frekuensi, beban maksimum dan panjang retak. Harga A dan n juga tergantung dari sudut retak awal dan analisis pola pembebanan yang menyebabkan adanya *mode I* dan *mode II*. *mixed mode*. Harga A dan n dari hasil analisis ditunjukkan pada tabel 1.

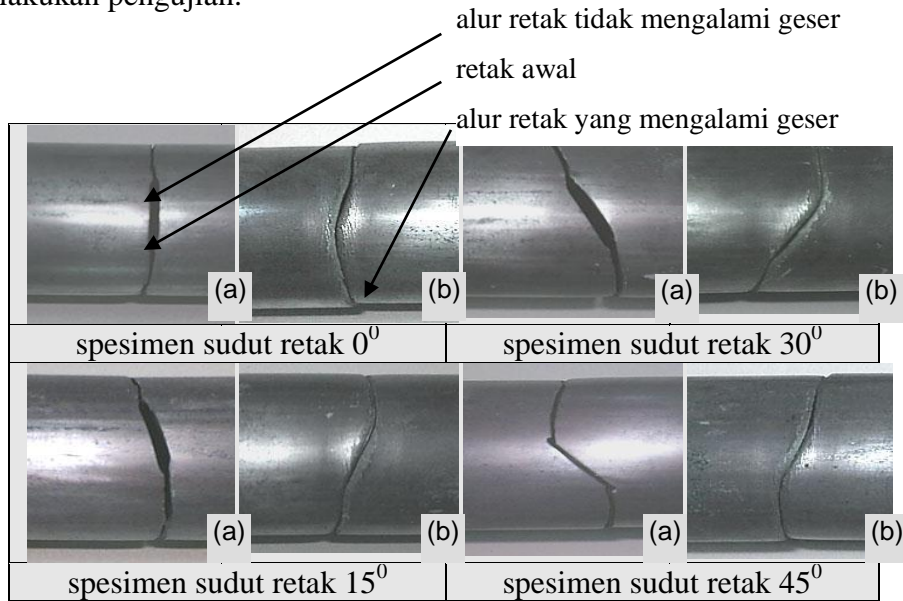
Tabel 1. Harga A dan n pada pengujian tarik dinamis

Pola pembebanan	Jenis spesimen (derajat)	A	n
<i>Mode I</i>	0	$2,9760 \times 10^{-16}$	5,4545
	15	$4,5298 \times 10^{-16}$	5,4262
	30	$6,1301 \times 10^{-15}$	5,0887
	45	$5,3202 \times 10^{-14}$	4,9768
<i>Mode II</i>	0	-	-
	15	$3,9378 \times 10^{-12}$	4,5642
	30	$3,1564 \times 10^{-14}$	5,4996
	45	$5,4229 \times 10^{-15}$	4,9768
<i>Mixed mode</i>	0	$2,9760 \times 10^{-16}$	5,4545
	15	$4,6251 \times 10^{-16}$	5,4262
	30	$2,9484 \times 10^{-15}$	5,0887
	45	$9,4807 \times 10^{-15}$	4,9768

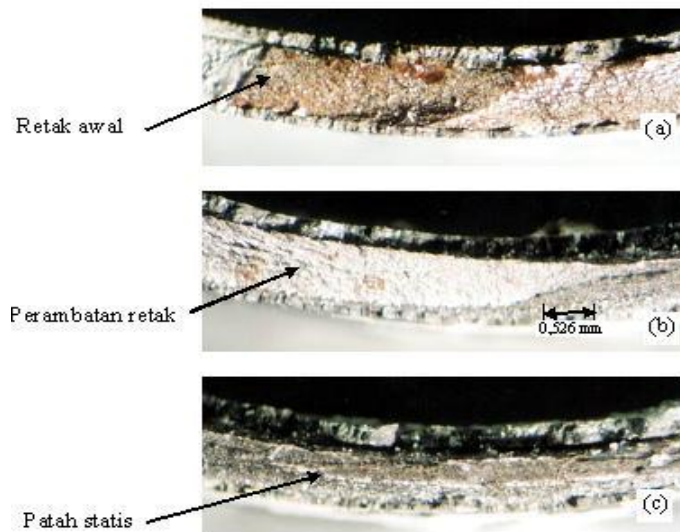
Dari tabel 1 terlihat bahwa pada setiap jenis spesimen yaitu spesimen dengan sudut retak 0° , 15° , 30° dan 45° harga A dan n selalu mengalami perubahan yang signifikan. Pada analisis *mode I* menunjukkan bahwa laju perambatan retak fatik terhadap bidang normal retak awal adalah mengalami penurunan, dimana penurunan terendah diperoleh pada spesimen sudut retak 45° dengan harga $n = 4,9768$. Sedangkan laju perambatan retak terhadap bidang gesernya (*mode II*) mengalami peningkatan, yaitu tertinggi terjadi pada spesimen sudut retak 45° dengan harga $n = 4,9768$, tetapi dalam hal ini spesimen sudut 0° tidak mengalami geser karena retak awalnya tegak lurus pada bidang normal. Pada analisis *mixed mode* yaitu analisis gabungan *mode I* dan

II laju perambatan retaknya dinyatakan menurun hal ini dapat dilihat harga-harga n pada tabel 1.

Secara visual dapat dilihat pada gambar 11 yaitu alur perambatan retak spesimen setelah dilakukan pengujian.



Gambar 11. Jenis patahan spesimen tampak depan (a) dan belakang (b) dengan variasi sudut retak 0° , 15° , 30° dan 45° pada pengujian tarik dinamis



Gambar 12. Struktur makro spesimen sudut retak 0° yaitu pada bagian daerah retak awal (a) , daerah perambatan retak (b) dan daerah patah statis (c)

Berdasarkan bentuk penampang patah hasil pengujian tarik dinamis, menunjukkan ciri-ciri terjadinya perpatahan lelah. Secara umum setiap penampang patahan terdapat tiga daerah yang menyatakan adanya retak awal, daerah perambatan retak dan daerah patah tiba-tiba (patah statis), sebagaimana ditunjukkan pada gambar 12 diatas.

4. KESIMPULAN

Laju perambatan retak fatik tarik dinamis yang dilakukan mulai dari spesimen sudut retak 0° , 15° , 30° dan 45° menunjukkan bahwa laju perambatan retak fatik terhadap bidang normal retak awal (*mode I*) mengalami penurunan yang signifikan yaitu

dari 5,45 menjadi 4,97 atau 8,75%, kemudian laju perambatan retak fatik terhadap bidang gesernya (*mode II*) mengalami peningkatan yaitu 8,29% sedangkan terhadap *mixed mode* laju perambatan retak menurun hingga 8,75%.

Berdasarkan bentuk penampang patahan, pada pengujian tarik dinamis menunjukkan kesamaan dalam pola pembentukan retak awal dan pola perambatan retaknya.

DAFTAR PUSTAKA

- Broek, D., 1986, "*Elementary Engineering Fracture Mechanics*", Fourth revised edition. Martin Nijhoff Publishers, Boston, USA.,
- Collins J.A., 1981, "*Failure of Materials in Mechanical Design*", New York.
- Dieter, G.E., 1990. "Metallurgi Mekanik", edisi ke-3, jilid I dan II, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Dowling, N.E. 1993. "*Mechanical Behavior of Material*", Prentice-Hall International Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Fuchs, H. O., 1980, "*Metal Fatik in Engineering*", Stanford University, California.
- Harkali Setiyono, 2011, "Metode Analisis Patah Lelah Baja Akibat Beban Lentur Dinamis", Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS), M.I. Mat. Kons. Vol. 11 No. 2 Desember 2011
- JIS. 1981, "*Steel and Cast Iron Product*", Japanese International Standards, Jepang.
- M. de Freitas, L. Reis., 2003, "*Evaluation of Small Crack Growth Models for Notched Spesimen Under/Torsional Fatigue Loading*" Mechanics, Automatic Control and Robotics Vol.3,no.13, 2003.
- Poquillon D. & Cabrillat. M.T., 2001, "*Mode II Creep Crack Initiation in 316 LN stainless steel*", Materials at High Temperatures 16(2) 99-107.
- Rolfe, S. T. & Barsom. J. M., 1977, "*Fracture and Fatigue Control in Structures (Applikasi of Fracture Mechanics)*", Englewood Cliff, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Surdia T., Saito., 1992, "Pengetahuan Bahan Teknik", Cetakan kedua, PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- Susilo A. W., 2001, "Pengaruh Bentuk Takik Spesimen baja Poros Terhadap Kekuatan Lelah Pada Pembebanan Puntir". Tesis, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.