

# SIMULASI PERAMBATAN RETAK LELAH PADA POROS AISI 1045 YANG DIKENAI BEBAN DINAMIK LENTUR AMPLITUDO TEGANGAN KONSTAN

Akhyar,<sup>1</sup> Ahmad Taufik Joenoes,<sup>2</sup> dan Syoni Suprijanto<sup>3</sup>

1. Lab. Material Teknik Mesin, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Buketrata, Lhokseumawe 24301
2. Bid. Rek. Mineral & Metalurgi, Rek. Pertambangan, PPs ITB, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132
3. Lab. Metalurgi Fisik dan Keramik, Rekayasa Pertambangan ITB, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132

## Abstrak

Penelitian ini dilaksanakan untuk mempelajari perubahan faktor intensitas tegangan pada permukaan poros dengan geometri retak setengah-elips yang dikenai beban dinamik lentur amplitudo tegangan konstan. Di samping itu, penelitian ini juga dilakukan untuk mencari suatu model prediksi laju perambatan retak lelah, kedalaman retak kritis dan umur lelah. Pekerjaan ini dilaksanakan dengan suatu model dan simulasi komputer. Untuk verifikasi dilakukan eksperimen lelah beban dinamik lentur pada spesimen poros AISI 1045 yang mempunyai diameter 15 mm. Ukuran retak awal diberikan 0,5 pada permukaan spesimen AISI 1045. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk kedalaman retak yang sama, semakin tinggi pembebanan semakin tinggi faktor intensitas tegangan dari poros retak permukaan dengan geometri retak setengah elips. Pada akhir perambatan retak terjadi kecenderungan perubahan geometri retak setengah elips menjadi setengah lingkaran, yakni  $b/a$  mendekati 1.0 untuk spesimen baja. Simulasi dan eksperimen berhasil memverifikasi kedalaman retak kritis dan umur lelah dengan tingkat akurasi antara 89% dan 92%; atau dengan nilai deviasi sebesar 8% dan 10% untuk baja. Fraktograf spesimen patah memperlihatkan kegagalan lelah terdiri dari (i) retak awal, (ii) penjalaran retak yang dinyatakan oleh beach mark dan (iii) patah akhir.

## Abstract

The current research was carried out to study the change of stress intensity factor ( $K_I$ ) on the semi-elliptical cracked crank subject to a constant amplitude cyclic loading. This research was also carried out to find the fatigue crack propagation model, the critical crack depth and to predict the fatigue life. The study was performed by using computer modeling and simulation, verified by series of fatigue tests on 15 mm diameter rod specimens made of AISI 1045 steel. The crack (0.5 mm) was introduced on the specimen surfaces as a crack initiation site. The result shows that, for the same crack depth, the higher the loading magnitude, the higher the stress intensity factor, and also, at the end of the crack propagation, semi-elliptical crack tends to be semi-circular one, or  $a/c$  ratio approaching unity (1.0). The fatigue experiment has been successfully verified that the critical crack depth and the fatigue life lie within 89% to 92% accuracy, and 8% to 10% deviation, respectively, compared to those obtained by the computer simulation. Fractography study has also revealed that the fracture path consist of; i) crack initiation site, ii) crack propagation, as indicated by beach mark, and iii) the final fracture.

**Keywords:** fatigue, shaft, crack propagation, semi elliptical crack, rotating bending load.

## PENDAHULUAN

Dalam suatu sistem struktur dan konstruksi mesin rotasi, poros merupakan salah satu bagian yang terpenting. Hampir semua mesin meneruskan daya bersama-sama putaran melalui porosnya. Poros seperti yang dipasang di antara roda-roda kereta barang, dimana tidak mendapat beban puntir, bahkan kadang-kadang tidak boleh berputar, disebut gandar (*axle*). Gandar ini hanya mendapat beban lentur saja, kecuali jika digerakkan oleh penggerak mula dimana akan mengalami beban puntir juga. Di samping itu, menurut bentuknya, poros dapat diklasifikasi atas poros lurus umum, poros engkol sebagai poros utama dari mesin torak, dan lain-lain.<sup>[1]</sup>

Untuk meningkatkan putaran operasi mesin, maka pabrik manufaktur merupakan salah satu pendorong penelitian perilaku dinamik poros itu. Putaran yang semakin tinggi mengharuskan putaran operasi berada di atas putaran

kritisnya, sehingga poros berperilaku sebagai batang fleksibel. Selain menimbulkan permasalahan baru dalam tahap desain, hal ini juga membawa persoalan perawatan yang perlu dicari solusinya. Bila mesin beroperasi menjadi lebih rawan terhadap adanya ketidaknormalan atau diskontinuitas pada permukaan komponennya, sehingga laju *deteriorasinya* menjadi lebih cepat.<sup>[2]</sup>

Karena itu, unjuk kerja mesin-mesin itu ditentukan oleh fungsi dari porosnya. Berbagai ketidaknormalan atau diskontinuitas pada poros dapat terjadi pada waktu desain dan fabrikasi material, yang biasanya berbentuk retak kecil.<sup>[3]</sup>

Di samping itu, retak dapat terjadi akibat adanya cacat dan atau goresan pada permukaan poros pada saat operasi atau perawatan. Retak kecil itu akan menjadi

inisiasi retak apabila dikenai beban bolak-balik dan kemudian diikuti oleh perambatan retak sampai putusnya poros dengan cepat, sehingga kerusakan yang *catastrophic* dapat terjadi. Perambatan retak pada poros terjadi akibat pembebanan mekanik dan termal yang bersifat siklik itu, biasanya disebut kegagalan poros akibat *fatigue*.

Walaupun telah lama menjadi obyek penelitian,<sup>[2]</sup> fenomena permukaan poros tersebut di atas merupakan persoalan yang masih memerlukan penelitian lebih lanjut, terutama dalam kaitannya dengan pengembangan teknik komputasi, prediksi, dan deteksi pada tahap awal. Kini, telah banyak badan riset dan industri yang melakukan penelitian mengenai retak permukaan pada batang bulat, tetapi penelitian tentang permukaan poros secara intensif dan ekstensif ini sangat jarang dilakukan.

Penelitian retak permukaan poros sebagai aplikasi mekanika retakan, baru dimulai oleh Blackburn (1976)<sup>[4]</sup>, kemudian dilanjutkan antara lain oleh Nisitani dan Chen (1984)<sup>[5]</sup>, T. Lorentzen, *et al.* (1986)<sup>[6]</sup>, Hojfeldt dan Ostervig (1986)<sup>[12]</sup>, Thompson (1991), dan Thompson dan Sheppard (1992)<sup>[7]</sup>. Di Indonesia, para ahli lebih tertarik untuk mengkaji fenomena permukaan retak poros dari aspek vibrasi, seperti yang dilakukan oleh Encu Saifudin (1999)<sup>[8]</sup>

Hasil penelitian telah merumuskan bahwa perambatan retak lelah secara normal dibagi ke dalam tiga bagian: inisiasi retak, penjaralan retak, dan akhirnya patah. Pada *Linear Elastic Fracture Mechanic* (LEFM) diasumsikan bahwa zona plastik dekat ujung retak adalah sangat kecil dan bahwa penjaralan retak berperan penting untuk mencapai kegagalan akhir, yang dapat diuraikan oleh suatu parameter tunggal yang disebut faktor intensitas tegangan ( $K$ ).<sup>[6]</sup>

Dalam penelitian ini kiranya dapat dikembangkan suatu model analisis faktor intensitas tegangan. Perhitungan  $K$ , dibatasi untuk retak permukaan setengah-elips pada poros diameter konstan dibebani oleh suatu momen konstan. Walaupun dalam praktik, poros memiliki geometri yang sangat kompleks dengan berbagai konfigurasi beban yang lain, seperti beban termal, beban torsi, dan lain-lain.<sup>[6]</sup> Karena itu, penelitian ini merupakan langkah pertama dalam mengembangkan suatu metoda teoritis yang dapat diperluas ke struktur poros yang sangat kompleks.

Namun demikian, kontribusi penelitian ini bukan hanya dapat ditujukan kepada masalah desain saja, tetapi juga untuk operasi, perbaikan dan perawatan. Dalam pengendalian mutu, apabila hasil uji tak merusak ternyata bahwa suatu poros baru cacat permukaan, maka poros tersebut harus dikeluarkan dan tidak boleh dipasarkan. Dalam kondisi mesin beroperasi, hasil rekam vibrasi menyatakan poros retak permukaan, maka poros tersebut dapat diprediksi profil retakan dan umur sisanya, sebelum dilakukan perbaikan dan perawatan. Salah satu hal yang dapat ditempuh adalah dengan pendekatan model dan simulasi perambatan retak lelah pada poros ini.

Karena itu, tujuan dilakukan penelitian ini untuk

1. Menentukan faktor intensitas tegangan pada poros retak permukaan setengah-elips, sebagai fungsi dari perubahan di zona retak yang, dikenai beban lentur siklik dengan amplitudo tegangan konstan.
2. Menentukan pengaruh rasio panjang retak antara sumbu minor dan sumbu mayor ( $b/a$ ) terhadap faktor intensitas tegangan.
3. Menghasilkan model prediksi permukaan patahan pada poros retak setengah-elips dan hasil pemodelan ini dibandingkan dengan hasil eksperimen.

Dalam tulisan ini, prediksi dibuat hanya untuk daerah perambatan retak lelah pada poros retak permukaan saja. Simulasi kontur perambatan retak dilakukan pada penampang melintang dari poros dengan geometri retak permukaan setengah-elips.

### FORMULASI PERSAMAAN PENGATUR

Dalam kasus ini kondisi batas bidang retak merupakan<sup>[11]</sup>

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{p(x,y)}{2G} \text{ untuk } \lambda=0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{untuk } v=0 \quad (2)$$

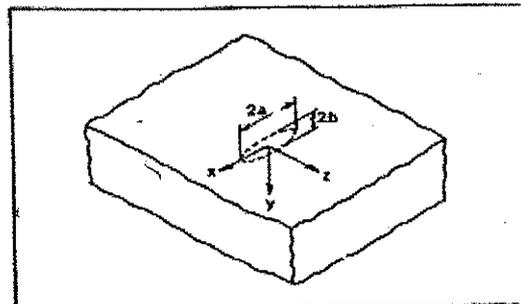
Masalah yang harus diperhatikan di sini, (suatu retak eliptik alam suatu setengah-ruang) mengandung simetri terhadap sumbu  $y$  dan demikian distribusi tekanan,  $p(x,y)$ , pada retak dalam suatu benda padat tak-berhingga yang mengandung orde  $x$  sebagai<sup>[6-11]</sup>

$$p(x,y) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q A_{ij} x^i y^j \quad (3)$$

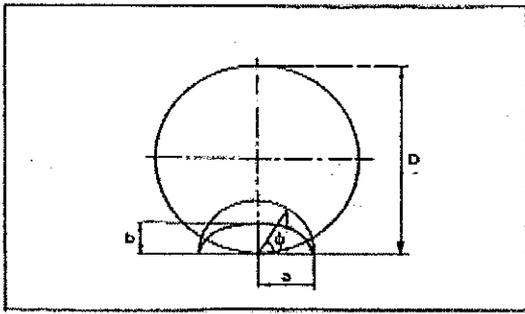
Faktor intensitas tegangan berkaitan dengan  $\phi$  dapat diperoleh melalui suatu prosedur yang diuraikan oleh Irwin.<sup>[2,10]</sup> Untuk pembebanan polinomial, ekspresi  $K$  dinyatakan<sup>[11]</sup>

$$K_I = \frac{8G}{ab} \sqrt{\frac{\pi}{ab} (a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi)^{1/4}} \left[ C_{00} + \frac{C_{01} \sin \phi}{b} + \dots \right] \quad (4)$$

Turunan parsial perlu untuk ekspresi ini dinyatakan  $A_{ij}$  adalah suatu konstanta, dan  $x$  dan  $y$  adalah koordinat sebagai didefinisikan dalam Gambar 1. Ekspresi  $(a,b)$  dipakai sebagai dimensi retak dan sudut  $\phi$  di sebarang titik sepanjang retak-muka, seperti Gambar 2 berikut ini.<sup>[6]</sup>



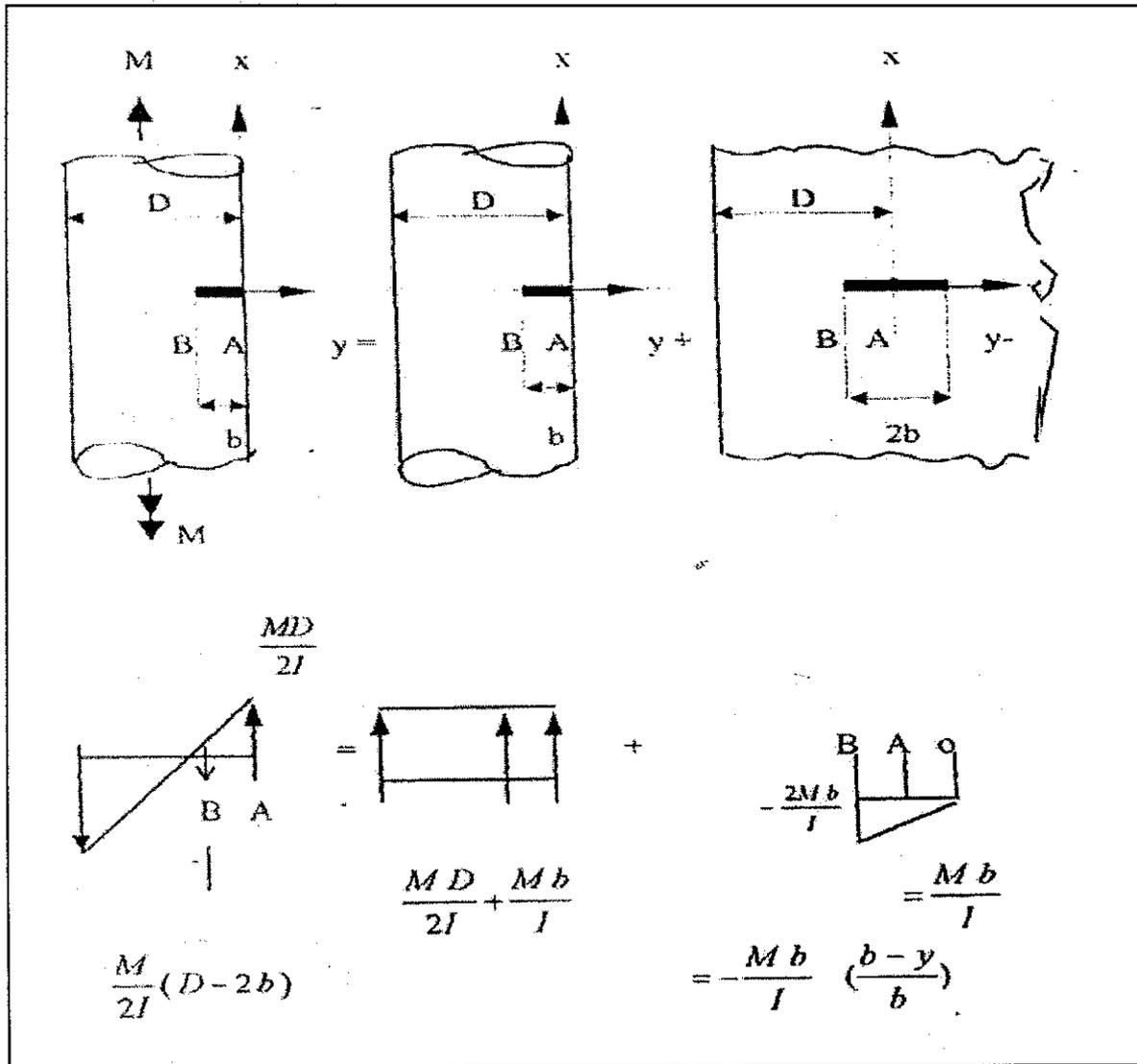
Gambar 1. Dimensi dan sistem koordinat lokal yang menguraikan retak elips tertanam.<sup>[6]</sup>



Gambar 2. Sudut  $\phi$  digunakan untuk menguraikan titik-titik sepanjang retak muka (*crack front*)<sup>[6]</sup>

Faktor intensitas tegangan untuk suatu retak permukaan semi-eliptik dalam sebuah plat yang dikenai beban lentur murni dapat diestimasi dengan superposisi dari faktor-faktor intensitas tegangan untuk dua masalah berikut ini seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.

1. Faktor intensitas tegangan untuk suatu retak permukaan semi-eliptik dalam sebuah plat dan dikenai tekanan *uniform* sebesar  $\frac{MD}{2I} (1 + \frac{2b}{D})$ .
2. Faktor intensitas tegangan untuk suatu retak eliptik dalam solida semi-tak-berhingga (pada titik terdekat terhadap permukaan bebas) dan dikenai variasi tegangan secara linier sebesar  $-\frac{Mb}{I} \frac{b-y}{b}$ .



Gambar 3. Distribusi tegangan dalam poros yang dikenai beban lentur dengan menggunakan Metoda Superposisi<sup>[11]</sup>

Faktor intensitas tegangan untuk masalah pertama -- suatu retak permukaan semi-eliptik dalam suatu plat dan dikenai beban seragam -- harus ditentukan pembesaran intensitas tegangan,  $M_K$ , pada permukaan retak-muka dan belakang, diperoleh dengan mengalikan pembesaran permukaan belakang dengan pembesaran permukaan retak-muka yang telah diperkirakan di atas. Menurut

Shah dan Kobayashi bahwa faktor intensitas tegangan untuk suatu retak permukaan pada kasus di atas dapat dihitung dengan persamaan<sup>[11]</sup>

$$K_I = M_K \left( \frac{MD}{2I} + \frac{Mb}{I} \right) \frac{\sqrt{\pi b/a}}{E(k)} (a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi)^{1/4} \quad (5)$$

Faktor intensitas tegangan untuk masalah kedua -- suatu retak eliptik dalam suatu benda padat semi-tak-berhingga dan dikenai variasi tekanan secara linier (b-y)/b -- dapat ditentukan untuk berbagai geometri retak eliptik mulai dari b/a = 0.1 sampai 0.99 dan jarak retak-ke-permukaan mulai dari b/D = 0.6, 0.75 dan 0.9 dengan rasio Poisson  $\eta = 0.3$ . Faktor intensitas tegangan untuk retak semi-eliptik dinormalisasikan terhadap hubungan faktor intensitas tegangan untuk suatu retak eliptik dalam suatu benda padat tak-berhingga (dan dikenai variasi tekanan secara linier (b-y)/b) sebagai<sup>[11]</sup>

$$K_I = -\frac{Mb}{I} M_L \cdot \frac{1}{E(k)} \left(\frac{\pi b}{a}\right)^{1/2} (a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi)^{1/4} * \left[1 - \frac{k^2 E(k) \sin \phi}{(1+k^2)E(k) - k^2 K(k)}\right] \quad (6)$$

Jadi, untuk menghitung faktor intensitas tegangan  $K$  merupakan penjumlahan persamaan (5) dan (6), maka diperoleh persamaan pengatur sebagai,<sup>[6]</sup>

$$K_I = \left[ M_L \left( \frac{MD}{2I} + \frac{Mb}{I} \right) - \frac{Mb}{I} M_L \left( 1 + \frac{k^2 E(k) \sin \phi}{(1+k^2)E(k) - k^2 K(k)} \right) \right] \times \left[ \frac{B_f 1.05}{E(k)} (b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi)^{1/4} \right] \left( \frac{\pi b}{a} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Persamaan (7) di atas merupakan persamaan akhir dari faktor intensitas tegangan mode bukaan 1 untuk poros yang dikenai beban lentur amplitudo konstan. Karena itu, harga momen lentur  $M$  diganti dengan selang momen lentur ( $\Delta M$  ke persamaan (7) supaya diperoleh harga selang intensitas tegangan. Jadi, untuk menghitung laju perambatan retak lelah mempunyai hubungan dengan selang intensitas tegangan ( $\Delta K$ ) dari Paris.<sup>[10]</sup>

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (8)$$

dengan  $C$  dan  $m$  merupakan konstanta material dari spesimen.

## METODOLOGI

Penelitian ini dibagi atas dua bagian, yaitu bagian simulasi dan bagian percobaan verifikasi. Untuk simulasi perambatan retak lelah dikerjakan berdasarkan persamaan pengatur (7), dikerjakan dengan program Matlab Versi 5.3. Prosedur prediksi dilakukan dari siklus ke siklus perambatan retak pada sejumlah  $i$  titik sepanjang batas retak. Dengan koordinat titik sepanjang batas retak yang tergantung pada kedalaman retak dan sudut yang dibentuk antara posisi titik terhadap sumbu mayor, maka  $\Delta K_I$  dihitung dengan persamaan (7) di atas. Kemudian perambatan retak inkremen dari siklus ke siklus pada setiap titik dapat dihitung dengan persamaan (8). Inkremen retak ini diambil tegak lurus terhadap semi-eliptik pada titik  $i$ . Karena harga  $C$  dan  $m$  dalam persamaan (8) dianggap sama ke semua arah, dan komponen inkremen retak ( $\Delta x_i$  dan  $\Delta y_i$ ) ini ditambah dengan komponen dari koordinat titik sebelumnya, sehingga muncul koordinat baru. Elips yang dicocokkan terhadap titik pasangannya koordinat baru ( $x_i$  dan  $y_i$ )

dengan metoda kuadrat kecil. Semi-elips yang dicocokkan itu dianggap sebagai batas retak baru dengan  $a_i$  dan  $b_i$  masing-masing kedalaman retak baru sumbu mayor dan sumbu minor. Dengan menggunakan ukuran retak baru tadi, dapat dihitung lagi koordinat selanjutnya untuk kedalaman retak pada siklus demi siklus berikutnya.

Kemudian setelah tahap prediksi dan simulasi tersebut, maka diverifikasi dengan melaksanakan pengujian lelah dinamik lentur 4-titik pada amplitudo tegangan konstan di laboratorium dari material paduan baja karbon medium AISI 1045 dengan komposisi kimia hasil uji spektrometri seperti dapat dilihat pada Tabel 1.

Prosedur percobaan dan ukuran sampel mengikuti acuan [12]. Pada sampel poros dibuat retak permukaan semi-eliptik (lihat gambar 2) dengan bantuan EDM dengan kedalaman retak awal 0,5 mm. Di samping itu, untuk mendapatkan data pendukung, dalam penelitian ini juga dilakukan beberapa pengujian tarik, dampak charphy, uji kekerasan dan analisis fraktografi.

Tabel 1. Komposisi paduan baja karbon AISI 1045

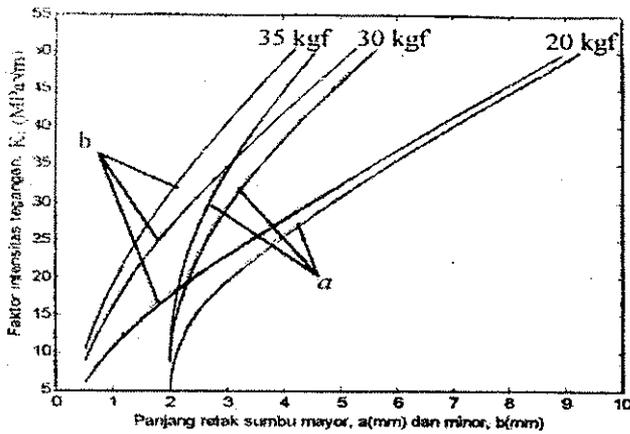
Unsur	C	Si	Mn	P	S	Cr
Kandungan (% Berat)	.451	.301	.283	.02	.009	.047
Unsur	Mo	Ni	Al	B	Co	Cu
Kandungan (% Berat)	.017	.04	.007	.002	.013	.126
Unsur	Nb	Pb	Sn	Ti	V	W
Kandungan (% Berat)	.054	.005	.032	.133	.190	.25

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam program kontur perambatan retak ini variabel yang mempengaruhi makin terjadinya penjarangan retak yang berasal dari retak awal adalah faktor intensitas tegangan. Keadaan tersebut menyebabkan setiap eksekusi program untuk setiap bilangan acak dari retak awal akan menghadirkan profil kontur dan data hasil perhitungan perambatan retak yang relatif berbeda pula. Input parameter yang menjadi masukan dalam simulasi ini berupa data sifat mekanik, konstanta fatik dan profil kontur perambatan retak paduan baja karbon medium AISI 1045 diperoleh dari eksperimen.<sup>[10]</sup>

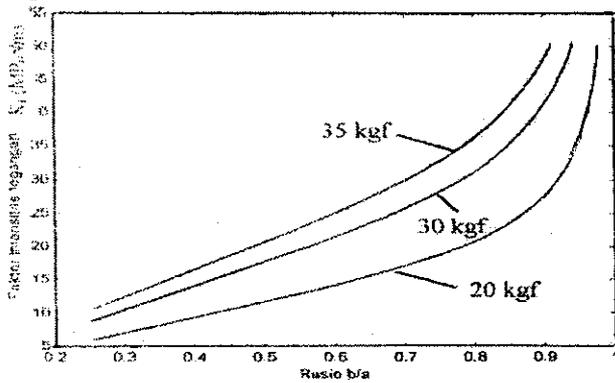
### Parameter Perambatan Retak

Keluaran program perambatan retak yang meliputi tampilan grafis simulasi, yaitu kontur perambatan retak dalam bidang dua dimensi, dan konstruksi kurva-kurva hubungan  $K_I$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $b/a$ ,  $da/dN$ ,  $\Delta K$  dan  $N$ . Dengan harga ketangguhan patah material AISI 1045 ( $K_{IC} = 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) sebagai kriteria akhir perambatan retak, pada gambar 4 tampak bahwa semakin kecil beban lentur yang diberikan, maka semakin besar harga panjang/kedalaman retak; sebaliknya semakin tinggi beban dinamik lentur yang diberikan, semakin kecil harga panjang/kedalaman retak.



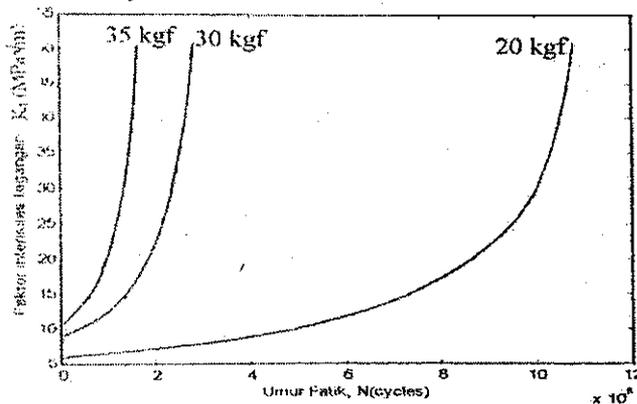
Gambar 4. Kurva  $K_I$  vs  $b$  dan  $a$ , Hasil Simulasi

Kemudian, pada gambar 5 tampak bahwa beban lentur yang kecil rasio ukuran retak ( $b/a$ ) mendekati 1,0. Artinya, pada beban dinamik lentur yang kecil, kontur penjalaran retak akhir mendekati bentuk geometri retak setengah lingkaran; sedangkan pada beban lentur yang besar, kontur cenderung berbentuk geometri retak semi-eliptik.

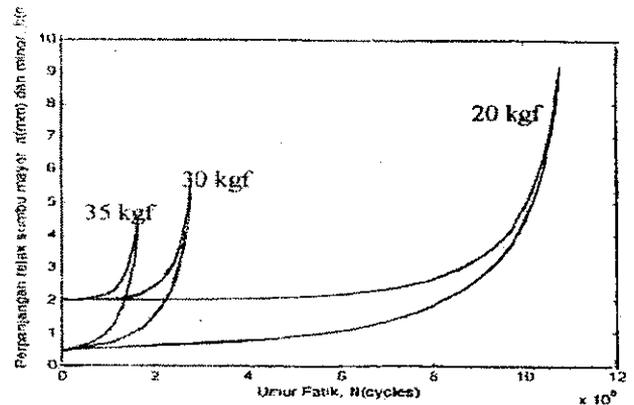


Gambar 5. Kurva  $K_I$  vs  $b/a$  Hasil Simulasi

Pada gambar 6 tampak bahwa semakin besar beban dinamik lentur yang diberikan, semakin kecil umur fatik; sebaliknya, semakin kecil beban dinamik lentur yang diberikan, semakin besar umur fatik. Dengan demikian penjaluran retak lebih panjang hingga mencapai akhir umur fatiknya.



Gambar 6. Kurva  $K_I$  vs  $N$ , Hasil Simulasi



Gambar 7. Kurva  $a$  dan  $b$  vs  $N$ , Hasil Simulasi

Pada gambar 7 tampak bahwa dengan ukuran retak awal yang sama pada setiap spesimen AISI 1045, semakin kecil beban dinamik lentur semakin besar ukuran retak akhir dan umur fatik; sebaliknya, semakin besar beban dinamik lentur semakin kecil ukuran retak akhir dan umur fatiknya. Demikian pula, jika beban dinamik lentur terus diberi tambahan, maka spesimen tidak akan patah fatik, tetapi getas/statik.

#### Laju Perambatan Retak Lelah

Dengan memasukkan konstanta material  $C$  dan  $m$  yang dikutip dari rujukan<sup>[10]</sup> dan harga selang faktor intensitas tegangan ke dalam persamaan Paris, maka diperoleh prediksi laju perambatan retak dalam poros retak permukaan setengah-elips amplitudo tegangan konstan. Apabila pembebanan yang makin besar, maka daerah perambatan retak dan umur lelah makin kecil; sebaliknya apabila pembebanan makin kecil, maka daerah perambatan retak dan umur lelah makin besar. Dengan demikian, jika laju perambatan retak tinggi, maka kedalaman retak dan umur lelah akan semakin pendek dari spesimen poros AISI 1045 ini.

#### Verifikasi

Kriteria verifikasi didasarkan pada data (i) kedalaman retak awal, (ii) umur lelah, dan (iii) dimensi kontur perambatan retak lelah. Keluaran program diasumsikan mendekati keadaan sebenarnya apabila kedalaman retak, laju perambatan retak, dan dimensi kontur penjaluran retak fatik hasil pemograman tidak jauh berbeda dari data sebenarnya dari eksperimen.

Sebelum diverifikasi, program dikalibrasi secara manual untuk mengetahui apakah program komputer telah melakukan perhitungan simulasi dengan benar. Prediksi laju perambatan retak lelah pada poros yang dikenai beban lentur dengan amplitudo tegangan konstan yang dikerjakan dengan memakai analisis dan metoda numerik (Shah dan Kobayashi, 1972 dan Lorentzen, *et al.* 1986). Perhitungan yang dikembangkan untuk sistem koordinat polar dua dimensi yang tegak lurus aksial (arah lentur) dalam arah  $x$  dan  $y$ .

Untuk memverifikasikan apakah kode bekerja secara tepat, handal, dan akurat, sebuah eksperimen fatik dinamik lentur 4-titik dengan amplitudo tegangan konstan yang dilaksanakan terhadap poros retak permukaan setengah-elips. Kemudian, dibandingkan antara hasil simulasi yang telah dihasilkan dengan hasil

eksperimen tersebut. Jika perbandingan ini merupakan suatu *excellent agreement*, maka dinyatakan prosedur prediksi akurat dan hasilnya *valid*.

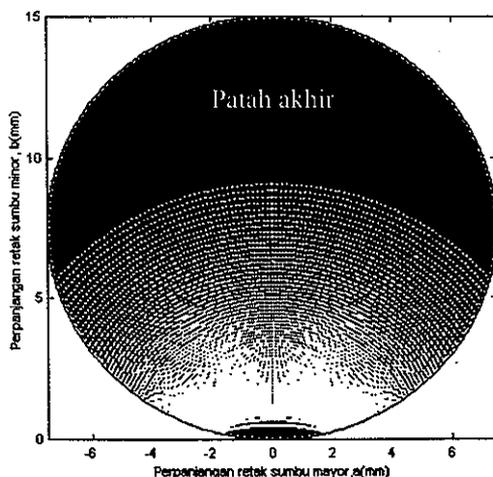
Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan di atas, maka kiranya dapat dibuat *resume* verifikasi. Resume verifikasi antara hasil simulasi dan hasil eksperimen yang dibuat hanya untuk kedalaman retak akhir ( $b_f$ ) dan umur lelah ( $N_f$ ) saja. Pada Tabel 2 ternyata bahwa hasil perbandingan antara simulasi dan eksperimen dari umur lelah dan kedalaman retak memiliki akurasi 89% dan 92% atau deviasi rata-rata masing-masing sebesar 8% dan 10% untuk spesimen poros AISI 1045. Hasil tersebut lebih baik dari hasil penelitian Lorentzen *et.all* (1986) yang memiliki deviasi sampai 15%.<sup>[6]</sup>

Tabel 5.1 : Resume Verifikasi Untuk AISI 1045

Poros AISI 1045	Spesimen		
	1	2	3
Diameter [mm]	15	15	15
$a_{\text{inisial}}$ [mm]	2,0	2,0	2,0
$b_{\text{inisial}}$ [mm]	0,5	0,5	0,5
$W_{\text{max}}$ [kgf]	20	30	35
$M_{\text{max}}$ [N-mm]	2.9E4	4.4E4	5.1E4
$\sigma_{\text{max}}$ [MPa]	88.8	133.18	155.4
Frekwensi [Hz]	50	50	50
$b_{\text{simulasi}}$ [mm]	9.2	5.5	4.3
$b_{\text{eksperimen}}$ [mm]	9.5	6.2	5.0
$b_{\text{simulasi}} / b_{\text{eksperimen}}$	0.96	0.89	0.86
$N_{\text{simulasi}}$ [cycles]	1.07E7	2.8E6	1.60E6
$N_{\text{eksperimen}}$ [cycles]	1.11E7	2.9E6	1.53E6
$N_{\text{simulasi}} / N_{\text{eksperimen}}$	0.84	0.89	1.05

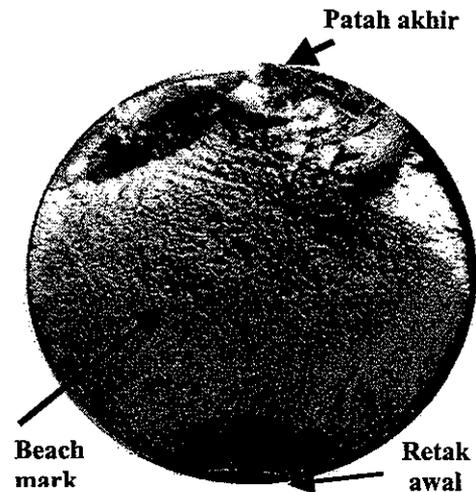
### Simulasi Perambatan Retak

Kontur patahan perambatan retak dalam poros retak permukaan semi-eliptik dengan beban dinamik lentur untuk bahan AISI 1045 hasil simulasi, dapat dilihat seperti pada gambar 9. Pada gambar 9, tampak bahwa hasil simulasi menunjukkan daerah retak awal, garis-garis *beach mark*, dan daerah patah akhir.



Gambar 9a. Kontur Penjalaran Retak Fatik Poros AISI 1045 Hasil Simulasi.

Di samping itu, kontur perambatan retak hasil eksperimen lelah dinamik lentur amplitudo tegangan konstan di laboratorium dapat dilihat seperti pada gambar 10. Kemudian, apabila dibandingkan dan diperhatikan antara gambar 9 dan gambar 10, maka tampak ada kemiripan secara signifikan sebagai kontur perambatan retak, karena adanya (i) daerah retak awal, (ii) daerah perambatan retak, dan (iii) daerah patah akhir.



Gambar 10. Kontur Pejalaran Retak Fatik Poros AISI 1045 Hasil Eksperimen

Pada permukaan patah, pada gambar 10, tidak begitu jelas *beach mark*, kecuali daerah getas yang pantas diduga sebagai daerah perambatan retak lelah. Pada batas antara daerah patah ulet dan getas itulah, diukur sebagai akhir penjalaran retak fatik. Karena material yang sangat ulet (lunak) atau yang sangat getas (keras) biasanya sangat sukar muncul *beach mark* dalam suatu eksperimen.<sup>[9,12]</sup> Hal ini, kemungkinan besar pengaruh material AISI 1045 yang cukup keras di dalam kelompok baja karbon medium.

Pada gambar 9 bahwa daerah perambatan retak dan kedalaman retak hasil simulasi lebih kecil daripada daerah penjalaran retak dan kedalaman retak hasil eksperimen (gambar 10). Dalam hal ini, akibat pengaruh harga ketangguhan patah ( $K_{IC}$ ) yang merupakan kriteria patah sebagai batas akhir simulasi, sedangkan pada eksperimen bukan hanya ketangguhan patah tetapi juga parameter lain seperti ukuran butir, arah kristal, inklusi dan kotoran yang dikandung material AISI 1045 sehingga permukaan patahan akhir pun tak seragam. Di samping itu, mungkin juga perilaku pembebanan yang tidak stabil, ketika retak telah mencapai 45% dari diameter spesimen, tiba-tiba terjadi pembebanan maksimum yang berakibat patah getas.

### KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan perbandingan antara simulasi dan eksperimen di atas, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Untuk kedalaman retak yang sama, dengan pembebanan semakin meningkat. Menghasilkan nilai faktor intensitas tegangan yang meningkat

2. Pada akhir perambatan retak, terjadi kecenderungan geometri retak setengah-elips menjadi setengah-lingkaran, yakni rasio panjang retak antara sumbu minor dan sumbu mayor ( $b/a$ ) mendekati 1,0 untuk poros baja (AISI 1045) dari ketiga beban dinamik lentur itu.
3. Simulasi dan eksperimen telah menghasilkan prediksi kedalaman retak kritis (akhir) dan umur lelah dengan tingkat akurasi antara 89% dan 92%; atau dengan nilai deviasi antara 8% dan 10% untuk baja tersebut.

Berdasarkan perbandingan antara simulasi dan eksperimen di atas, dapat direkomendasikan sebagai berikut:

1. Mengembangkan penelitian lebih lanjut program komputer untuk poros retak permukaan dengan geometri retak semi-eliptik (AISI 1045) tetapi untuk poros yang telah mengalami proses *shot-peening*.
2. Melakukan penelitian yang lebih mendalam tentang pengaruh pembebanan dinamik lentur terhadap perambatan retak lelah untuk material yang berbeda.
3. Untuk meningkatkan akurasi dan validasi simulasi, maka perlu dilakukan verifikasi dengan menggunakan uji fatik yang dilengkapi sensor perubahan dimensi retak.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih atas bantuan dana dari BBPS DIKTI Depdiknas dan perorangan lainnya. Penulis juga menyampaikan apresiasi atas bantuan bahan spesimen dari PT. Dirgantara Indonesia dan tempat uji fatik rotasi lentur amplitudo konstan di MIDC Deprindag.

#### PUSTAKA

- [1] Spotts, M.F., *Design of Machine Elements*, 6th Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1985.
- [2] H.O. Fuchs, and R.I. Stephens, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, New York and Singapore (1980).
- [3] H. P. Bloch and F. K. Geitner, *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*, Gulf Publishing Company, Houston and London, (1986).
- [4] W. S. Blackburn, Calculation of stress intensity factor for straight grooved and ungrooved shafts, *Engng Fracture Mech.* 8, 731-736, (1976).
- [5] H. Nisitani, Behavior of Small Cracks in Fatigue and Relating Phenomena in T. Tanaka, et.al. (ed), *Current Research on Fatigue Cracks*, Vol. 1, Elsevier Applied Science, London and New York, (1987).
- [6] T. Lorentzen, N.E.Kjaer and T.K. Hendrikson, The application of fracture mechanics to surface crack in shafts. *Engng Fracture Mech.* 23, 1005-1014 (1986).
- [7] K. D. Thompson and S. D. Sheppard, Stress intensity factors in shafts subjected to torsion and

axial loading, *Engng Fracture Mech.* 42, 1019-1034 (1992).

- [8] Encu Saifudin, *Kaji Eksperimental Pengaruh Retak Melintang Buatan pada Poros Terhadap Prilaku Dinamika Rotor*, Tesis Magister, Program Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung, (1999).
- [9] ASM, *Metal Handbook: Failure Analysis and Prevention*, Vol.10, ASM, The Metal Park, (1992).
- [10] D. Broek, *The Practical Use of Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and London (1988)
- [11] R. C. Shah and A.S. Kobayashi, On the surface flaw problem in, *The surface crack: physical problem and computational solution*, J.L. Swedlow (ed.), ASME, New York, 1972.
- [12] Tokyo Fatigue Equipment, Pte. Ltd., *Fatigue Rotating Bending Constant Amplitude Manuals*, Tokyo Fatigue Equipment Ltd., Tokyo (1992).

#### DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

$a$	Sumbu elips semi mayor, panjang retak,
$A_{ij}$	Konstanta polinomial dari Shah dan Kobayashi.
$b$	Sumbu elips semi minor, kedalaman retak
$B_f$	Suatu konstanta yang merepresentasikan suatu beban momen konstan pada struktur
$C$	Faktor material dari persamaan Paris
$D$	Diameter poros
$E$	Modulus elastisitas (modulus Young)
$E(k)$	Integral eliptik sempurna jenis kedua
$G$	Modulus geser
$I$	Momen inersia
$k, k'$	Modulus dan modulus complementer fungsi eliptik Jacobian, masing-masing dengan $k^2 = (1 - b^2/a^2)$ ; $k'^2 = 1 - k^2$
$K(k)$	Integral eliptik sempurna jenis pertama
$K_I$	Faktor intensitas tegangan moda bukaan
$K_{IC}$	Faktor intensitas tegangan kritis untuk moda bukaan (ketangguhan material)
$\Delta K$	Selang faktor intensitas tegangan.
1.05	Faktor koreksi mikro 5% untuk perubahan keadaan tegangan dekat permukaan, agar momen lentur terjaga konstan di sepanjang poros; disebut juga faktor Lorentzen (1986)
$M$	Momen lentur yang bekerja pada spesimen
$M_K$	Faktor pembesaran intensitas tegangan untuk retak permukaan semi-eliptik di dalam poros yang dikenai beban tarik seragam.
$M_L$	Faktor pembesaran intensitas tegangan untuk retak permukaan semi-eliptik di dalam benda semi-tak-hingga yang dikenai beban variasi tekanan linier pada permukaan retak
$m$	Faktor material dari persamaan Paris.
$N$	Umur fatik (cycles)
$r$	Jari-jari retak muka
$R$	Jari-jari poros; rasio antara tegangan minimum dan maksimum
$x, y, z$	Koordinat empat persegi panjang
$\eta$	Rasio Poisson
$\phi$	Fungsi tegangan harmonik; sudut parametrik dari rumus elips : $x = a \sin \phi$ , $y = a \cos \phi$