

PENGARUH BESAR BUTIR TERHADAP KEKUATAN FATIK EKSPERIMEN, PERHITUNGAN DAN SIMULASI

H. Agus Suhartono

B2TKS - BPPT

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

ABSTRAK

PENGARUH BESAR BUTIR TERHADAP KEKUATAN FATIK EKSPERIMEN, PERHITUNGAN DAN SIMULASI. Dari penelitian terakhir diketahui bahwa indikasi retak pada tahap awal sangat dipengaruhi oleh struktur mikro bahan, seperti fasa dan besar butir. Pada penelitian ini dilakukan pemeriksaan kekerasan dan perhitungan kekuatan fatik dari baja karbon yang memiliki diameter butir yang berbeda. Sebuah program simulasi perambatan retak dibuat dengan berdasarkan kepada model yang memperhitungkan: kondisi tegangan setempat, keadaan random dari sistem bidang geser serta batas butir. Tujuan dilakukannya simulasi tersebut adalah untuk lebih memahami pengaruh struktur mikro terhadap proses kerusakan akibat beban fatik. Perhatian khusus diberikan terhadap perambatan retak pada berbagai macam besar butir yang dibebani dengan beban tarik tekan dengan memperhitungkan pengaruh pembebanan tersebut terhadap umur fatik bahan. Hasil simulasi digunakan untuk perbandingan secara kualitatif dengan kekuatan fatik hasil perhitungan yang diolah dari nilai pengujian kekerasan. Model tersebut dapat menunjukkan bahwa ukuran butir sangat berpengaruh terhadap perambatan retak bahan. Hasil perhitungan dan simulasi menunjukkan bahwa peningkatan diameter butir mengakibatkan penurunan kekuatan fatik bahan.

Kata kunci : Besar butir, retak mikro, fatik, simulasi

ABSTRACT

THE EFFECT OF GRAIN SIZES ON FATIGUE TENSILE EXPERIMENT, CALCULATION AND SIMULATION. The present research results recognize that the growth of microcracks is significantly influenced by the microstructure of the material. This paper describes the mechanical testing and calculation of fatigue life of carbon steel with different grain sizes. In order to take into account the influences of the microstructure on the damage process a simulation model is suggested in this paper that considers the local stress state in addition to the random nature of the material structure in the form of grain boundaries and slip systems. Special emphasis is given to the micro crack behaviors for different grain sizes, which is loaded by an axial tension compression loading with regard to their influence on the micro crack growth and the simulated lifetime. It can be shown, that grain size causes a significant changing in the crack growth behaviors. The results generated by means of the simulation model are compared with those of the calculation that based on the hardness testing results. It is showed that increasing the size of grains has lead to the decrease of fatigue life.

Key words : Grain sizes, micro crack, fatigue, simulation

PENDAHULUAN

Pada pembebanan berulang, mikrostruktur bahan sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan retak, oleh karena itu untuk memperbaiki akurasi prediksi umur fatik, perlu mempertimbangkan proses kerusakan secara mikroskopis.

Simulasi retak mikro, memungkinkan verifikasi hipotesa yang ada dengan hasil eksperimen, selain itu parameter-parameter yang lain seperti ukuran butir dapat diamati, sehingga mekanisme kerusakan akibat pembebanan fatik yang dipengaruhi oleh parameter-parameter tersebut lebih mudah untuk dipahami.

Makalah ini akan membahas mengenai eksperimen, perhitungan dan simulasi yang menyelidiki pengaruh besar butir terhadap kekuatan fatik bahan.

TEORI

Material berfasa tunggal terdiri atas sejumlah kristal tunggal atau butir. Semua butir memiliki struktur kristal dan komposisi kimia yang sama, perbedaan terletak pada orientasi yang mengakibatkan terjadinya batas kristal atau lebih umum disebut batas butir antar

kristal atau batas butir. Susunan atom pada batas butir sangat tidak beraturan bila dibandingkan dengan susunan atom dalam butir. Tampak foto mikro dua dimensi dari batas butir adalah sejumlah garis, tetapi dalam kenyataannya, batas butir merupakan permukaan antar kristal [1].

Paduan umumnya memiliki banyak kristal yang dapat diamati dengan mikroskop. Baja berkrystal BCC yang mengandung unsur paduan dalam jumlah yang sangat sedikit dalam bentuk larutan padat disebut ferit. Batas butir mempunyai energi permukaan yang tinggi, dengan energi yang tinggi ini, batas butir merupakan tempat utama terjadinya reaksi bahan padat (*solid state reactions*) seperti difusi, transformasi fasa, dan reaksi pengendapan. Energi tinggi dari batas butir biasanya mengakibatkan konsentrasi atom terlarut yang lebih tinggi di batas butir dibandingkan di dalam butir [1].

Pergerakan atom sepanjang batas butir lebih cepat dibanding pergerakan atom melalui susunan kristal. Bila dilakukan etsa, batas butir terserang lebih cepat oleh larutan asam dan meninggalkan jejak dangkal pada batas butir. Di bawah pengamatan mikroskop batas butir yang telah dietsa tersebut tampak sebagai garis-garis gelap.

Hubungan antara kekuatan logam dan besar butir telah diberikan oleh Hall-Petch [2,3] sebagaimana diberikan pada persamaan (1). Persamaan tersebut disusun berdasarkan pengukuran titik luluh baja karbon rendah, dan dapat menggambarkan antara besar butir dan tegangan alir pada berbagai harga regangan plastik hingga perpatahan rapuh. Selain itu dapat pula menggambarkan variasi tegangan perpatahan rapuh dengan besar butir dan ketergantungan kekuatan fatik pada besar butir.

$$\sigma_y = \sigma_i + k \cdot D^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(1)$$

dimana :

- σ_y = tegangan luluh ketahanan kisi kristal terhadap pergerakan dislokasi
- k = parameter kontribusi pengerasan relatif oleh batas butir
- D = diameter butir

Deformasi logam pada dasarnya merupakan hasil pergerakan dislokasi. Karena orientasi/arah bidang geser antar butir tidak seragam, maka gerakan dislokasi akan terhambat oleh batas butir. Makin halus ukuran butir maka presentasi batas butir akan makin banyak pula, sehingga ketahanan deformasi logam akan meningkat.

Terdapat hubungan antara sifat kekerasan dan kuat tarik. Tabor [4] mengajukan suatu metode yang dapat digunakan untuk menentukan daerah plastis kurva tegangan regangan sejati dari hasil pengukuran

kekerasan. Pada dasarnya metode tersebut bersifat empiris, karena distribusi tegangan yang kompleks pada jejak indentasi menghalangi hubungan yang jelas dengan distribusi tegangan pada uji tarik maupun uji tekan. Akan tetapi metode tersebut memperlihatkan kecocokan pada berbagai logam, sehingga layak untuk diperhatikan apabila situasi tidak memungkinkan untuk melakukan pengujian tarik logam.

METODE PERCOBAAN

Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah baja karbon rendah jenis AISI 1010. Bahan tersebut memiliki komposisi sebagai berikut: C 0,1%, Si 0,31%, Mn 1% dan S 0,005 %, dan Fe sebagai sisanya.

Cara Kerja

Penelitian dilakukan di Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur BPPT. Pengujian yang dilakukan meliputi: karakterisasi bahan baku, metalografi, dan penentuan sifat mekanis selain itu dibuat program komputer simulasi untuk lebih memahami hubungan antara besar butir dan perambatan retak fatik atau kekuatan fatik.

Berbagai ukuran besar butir logam dibuat dengan melakukan variasi suhu dalam proses *annealing* pada jenis logam yang sama. Benda uji dipanaskan sampai mencapai suhu yang diinginkan kemudian ditahan selama lebih kurang 45 menit dan selanjutnya didinginkan perlahan di dalam dapur. Suhu *annealing* yang dilakukan pada penelitian adalah 930°C, 1000°C dan 1140°C. Variasi komposisi kimia akibat dekarburisasi pada proses *anil* diminimalkan dengan melakukan pengujian hanya pada penampang dalam dari benda uji.

Uji kekerasan yang dilakukan adalah menggunakan metode Brinell. Indentasi dilakukan dengan mesin Frank Finotest yang menggunakan sistem hidrolik. Dari hasil uji kekerasan dilakukan perhitungan kekuatan tarik berdasarkan standar DIN 50350 dan DIN 50351. Besar kekuatan fatik kemudian diturunkan dari hasil perhitungan tersebut dengan mengikuti Prosedur Perhitungan Kekuatan Fatik [5,6].

Struktur mikro logam diperoleh melalui proses metalografi. Hal ini dilakukan untuk mengetahui ukuran besar butir dari hasil proses *annealing*.

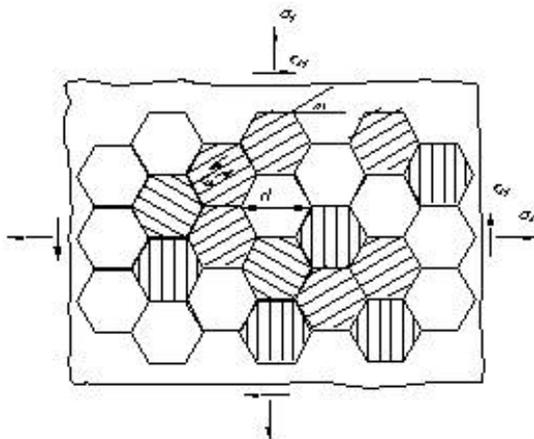
Dalam penelitian ini bahan yang digunakan adalah baja karbon rendah yang mendapat perlakuan *annealing*, sehingga struktur mikro yang mungkin dihasilkan adalah fasa ferit dan perlit. Fasa ini umumnya memiliki butir dan batas yang jelas sehingga metode yang cocok dan sering dipakai untuk menghitung besar butir adalah metode Planimetri (*Jeffris method*) [7].

Simulasi

Dalam simulasi dilakukan pendekatan bahwa pertumbuhan retak dibagi menjadi dua tahap yaitu tahap 1 dan tahap 2. Pada tahap 1, perambatan retak dipicu oleh tegangan geser dinamis pada butir dalam material polikristal. Perambatan retak tergantung pada amplitudo tegangan geser dan jarak (*s*) antara ujung retak dan hambatan strukturmikro (batas butir). Persamaan pertumbuhan retak tahap 1 diberikan sebagai berikut:

$$\frac{da}{dN} = A \Delta \tau_o^\alpha \cdot s \dots\dots\dots (2)$$

dimana *s* jarak ujung retak dan batas butir, *A* dan *a* adalah parameter material [8,9].



Gambar 1. Simulasi: strukturmikro, keadaan tegangan dan orientasi tegangan

Pada awal simulasi pertumbuhan retak sangat cepat, tapi saat retak mencapai batas butir (*s* » 0) kecepatan retak berkurang hingga mendekati nol. Pada model ini batas butir di anggap sebagai hambatan mikro yang paling dominan.

Material polikristal dimodelkan secara dua dimensi sebagai jaringan butir heksagonal dengan diameter butir yang dapat divariasikan dan masing masing butir memiliki orientasi kristal *w*, Gambar 1.

Kondisi tegangan pada bidang geser tiap butir tergantung dari orientasi masing-masing butir dan pembebanan yang dilakukan. Tegangan yang dipergunakan disini adalah tegangan bidang diperbukaan bahan. Letak nukleasi retak dihasilkan dari generator random. Bentuk dari bakalan retak adalah titik yang tidak memiliki panjang, yang mewakili retak yang memiliki panjang nol. Nukleasi retak diasumsikan sudah terbentuk pada awal simulasi dan pertumbuhan retak terjadi langsung saat pembebanan pertama dilakukan.

Saat retak tahap I memiliki panjang yang cukup untuk memungkinkan terjadinya pembukaan pada ujung retak, mulailah terjadi perkembangan perambatan retak tahap 2. Pada titik ini, pengaruh strukturmikro menjadi berkurang, dan retak dapat

digambarkan dengan mekanika continuum. Diasumsikan bahwa selama tahap transisi terjadi kompetisi antara pertumbuhan butir tahap I dan pertumbuhan butir tahap II. Persamaan pertumbuhan retak tahap 2 yang diajukan oleh Hobson, Brown dan de los Rios [10] digunakan pada simulasi ini.

$$\frac{da}{dN} = B \Delta \sigma_o^\beta \cdot a^z \dots\dots\dots (3)$$

dimana *Ds* mewakili tegangan tarik yang tegak lurus terhadap bidang retak dan *b*, *B* and *D* adalah parameter material yang ditentukan dari percobaan. Parameter material yang digunakan diambil dari Hobson [10].

Panjang retak pada transisi dari tahap 1 ke tahap 2 dapat disebutkan dengan jumlah butir yang dilewati retak. Taylor and Knott [11] mengusulkan 3 butir sebagai fasa transisi tahap 1 ke tahap 2. Pada daerah transisi pertumbuhan retak dihitung berdasarkan nilai yang lebih tinggi antara persamaan 1 dan persamaan 2 [11]. Selain pertumbuhan retak akibat beban berulang, perambatan yang sangat cepat bisa terjadi pada eksperimen yaitu diakibatkan oleh penggabungan antar retak [11]. Pada simulasi ini penggabungan antar retak terjadi bila panjang retak telah mencapai 75% dari batas butir, dan jarak antar ujung retak lebih kecil dari jarak kritis, *r*. Socie dan Furman [12] menyarankan jarak kritis adalah 25% dari diameter.

Setelah retak mencapai panjang 3 diameter butir, hanya berlaku pertumbuhan retak tahap 2. Dalam hal ini retak kemudian tumbuh tegak lurus terhadap arah tegangan utama dan kecepatan perambatan retak tergantung pada panjang retak dan amplitudo tegangan utama.

$$\frac{da}{dN} = B \Delta \sigma_1^\beta \cdot a^z - C \dots\dots\dots (4)$$

Simulasi selesai bila jumlah siklus tegangan tercapai, atau retak mikro mencapai panjang yang telah ditetapkan. Panjang retak didefinisikan sebagai garis lurus jarak antar kedua ujung retak. Jika retak terbentuk dari penggabungan beberapa retak mikro, panjang retak diwakili oleh ujung-ujung retak yang memiliki jarak paling jauh. Pada simulasi ini panjang retak akhir ditetapkan 500 µm.

Simulasi ini belum mempertimbangkan retak yang tumbuh ke arah dalam dari material. Lebih lanjut deformasi dari strukturmikro, pengerasan regang dan pengaruh pembukaan retak serta tekstur dan anisotropi material belum di pertimbangkan.

Pelaksanaan kegiatan meliputi persiapan material, pembuatan specimen dan komponen. Hasil yang dicapai yaitu mengetahui mekanisme pengaruh besar butir terhadap kekuatan dan umur fatik dengan metode eksperimen, perhitungan dan simulasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji laboratorium dan hasil perhitungan diberikan sebagai berikut :

Metalografi

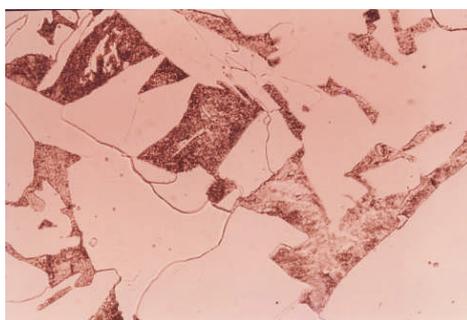
Hasil pemeriksaan metalografi diperlihatkan pada Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4. Dari pengamatan strukturmikro diketahui bahwa baja yang diperiksa merupakan baja karbon rendah. Strukturmikro terdiri atas matriks ferit diselingi oleh sebagian kecil fasa *pearlite*.



Gambar 2. Strukturmikro baja SC 10 suhu *annealing* 930°C, 45 menit



Gambar 3. Strukturmikro baja SC 10 suhu *annealing* 1000°C, 45 menit



Gambar 4. Strukturmikro baja SC 10 suhu *annealing* 1140°C, 45 menit

Pemeriksaan strukturmikro menunjukkan bahwa *annealing* pada tahap suhu lebih rendah menyebabkan rekristalisasi dan menghaluskan butir. Pada suhu yang lebih tinggi terjadi perkembangan besar butir .

Pengukuran Besar Butir

Pengukuran besar butir dilakukan dengan mengolah data hasil metalografi baja yang telah dilakukan *annealing*. Foto strukturmikro menunjukkan bahwa fasa yang terjadi merupakan fasa ferit dan sebagian kecil fasa *pearlite*. Pengukuran dan perhitungan besar butir dilakukan dengan metode planimetri (*Jeffris method*) yaitu menghitung besar butir persatuan luas pada lingkaran berdiameter 79,8 mm (luas lingkaran 5000 mm²) [7].

Perhitungan matematis :

$$N_A = f \cdot \left(n_i + \frac{1}{2} n_o \right) \quad f = \frac{M^2}{5000} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\bar{A} = N_A^{-1} \times 10^6 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$d = (\bar{A})^{\frac{1}{2}} = N_A^{-\frac{1}{2}} \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$G = 3,32 \cdot \log N_A - 2,92 \quad \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

n_i = jumlah butir di dalam lingkaran

n_o = jumlah butir yang terpotong lingkaran

N_A = banyaknya butir/luas (pcs/mm²)

f = bilangan Jeffris

M = perbesaran (x)

\bar{A} = luas rata-rata butir (μm^2)

d = diameter butir rata-rata (μm)

G = nomor besar butir (ASTM)

Hasil perhitungan besar butir terhadap foto struktur mikro ditampilkan pada Tabel 1.

Pada suhu *anneal* 930°C didapat diameter rata-rata 11,54 mm. Pada suhu *anneal* yang lebih tinggi yaitu 1000°C terjadi pertumbuhan butir yang sangat intensif, Pada tahap ini proses rekristalisasi telah selesai sehingga energi yang ada hanya digunakan untuk pertumbuhan butir.

Sejalan dengan terjadinya pemanasan lanjut orientasi kristal butir kecil mengikuti orientasi butir besar sehingga jadi penggabungan butir menjadi butir yang lebih besar. Ukuran butir pada suhu *anneal* ini adalah 21,61mm. Pada suhu 1140°C pertumbuhan butir berlanjut dengan kecenderungan peningkatan suhu menyebabkan peningkatan diameter butir menjadi 42,18 mm.

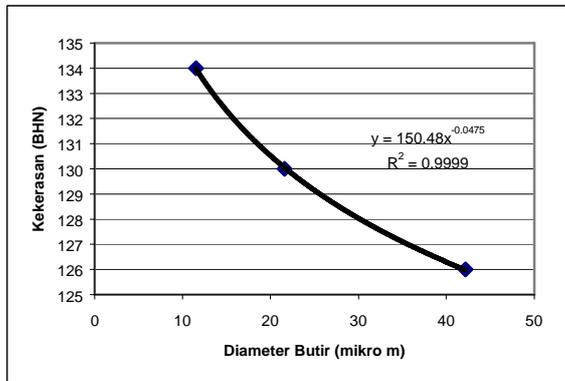
Pengujian Kekerasan

Penjejukan dilakukan pada 5 (lima) tempat pada penampang lintang sampel hasil uji strukturmikro yang sudah licin permukaannya. Pengukuran diameter jejak arah vertikal dan horizontal dengan menggunakan mikroskop pengukur jejak. Nilai rata-rata hasil uji kekerasan diberikan pada Tabel 2.

Hubungan antara besar butir dan kekerasan ditunjukkan pada Gambar 5. Bila dikorelasikan antara

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan

No	Benda Uji	BHN
1	A 930°C	134
2	A 1000°C	130
3	A 1140°C	136

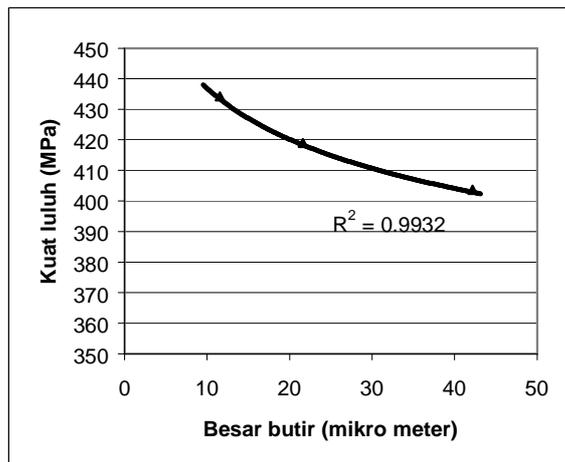


Gambar 5. Hubungan antara kekerasan dan diameter butir

ukuran butir dan sifat kekerasan maka akan didapat kecenderungan (*trend*), dari gambar tersebut tampak jelas hubungan bahwa peningkatan diameter butir diikuti dengan terjadinya penurunan kekerasan.

Hubungan Besar Butir dan Kekuatan Fatik

Kekuatan luluh offset 0,2% dapat ditentukan dengan ketelitian yang baik dari pengujian kekerasan Vickers. Terdapat pula hubungan rekayasa yang sangat berguna antara kekerasan *Brinell* dengan kekuatan tarik maksimum dari paduan baja karbon biasa dan medium yang mengalami perlakuan panas.



Gambar 6. Hubungan diameter butir dan kuat luluh

Menurut DIN 50350 [5] kekuatan tarik dapat diturunkan dari Nilai kekerasan *Vickers* berdasarkan rumus :

$$\sigma_u = 3,38 \cdot VHN \dots\dots\dots (9)$$

Persamaan tersebut berlaku untuk kekerasan antara 80 VHN hingga 650 VHN. Pada standard DIN 50351 [5] diberikan korelasi antara nilai kekerasan Brinell dan kekuatan tarik yaitu:

$$\sigma_u = 3,5 \cdot BHN \dots\dots\dots (10)$$

Menurut Hueck [6,13] kuat luluh pada baja dapat dihitung dari kuat tarik berdasarkan rumus:

$$\sigma_y = 1,09\sigma_u - 77 \dots\dots\dots (11)$$

sehingga dapat tegangan luluh dan besar butir untuk menguji dan mengevaluasi apakah formula yang diusulkan oleh Hall-Pecht [2,3] berlaku untuk bahan dan keadaan yang terjadi pada penelitian ini. Persamaan (1) merupakan persamaan yang sangat umum dan harus digunakan secara hati-hati. Hubungan antar kuat luluh dan besar butir diberikan pada Gambar 6 .

$$\sigma_y = 370 + 218 \cdot D^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (12)$$

dimana :

σ_y = tegangan luluh

370 = “tegangan gesek yang merupakan ketahanan kisi kristal terhadap pergerakan dislokasi (σ_i)

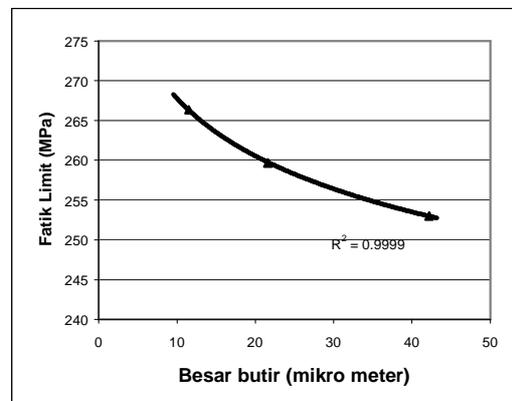
218 = “parameter bahan” yang menjadi ukuran kontribusi pengerasan relatif oleh batas butir (k)

D = diameter butir

Perhitungan kekuatan dan ketahanan fatik dapat diturunkan dari sifat-sifat mekanis bahan.[5,6]

Hubungan antara fatik limit dan titik luluh dapat dinyatakan dengan hubungan:

$$\sigma_w = 0,436\sigma_y + 77 \dots\dots\dots (13)$$



Gambar 7. Hubungan diameter butir dan fatik limit

dari persamaan (13) didapat,

$$\sigma_w = 161,3 + 95 \cdot D^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (14)$$

Hubungan antara fatik limit dan besar butir ditunjukkan pada Gambar 7.

Hasil perhitungan ini menunjukkan hubungan bahwa kekuatan fatik berbanding terbalik dengan akar pangkat dua dari besar butir, yang berarti peningkatan ukuran butir akan menurunkan kekuatan fatik bahan.

Pembuatan garis regresi kurva hubungan antara fatik limit vs besar butir disertai dengan perhitungan koefisien determinasi, R^2 (*R-squared value*) dan koefisien korelasi, R . Koefisien-koefisien tersebut merupakan indikator nilai perkiraan yang didapat dari hasil penarikan

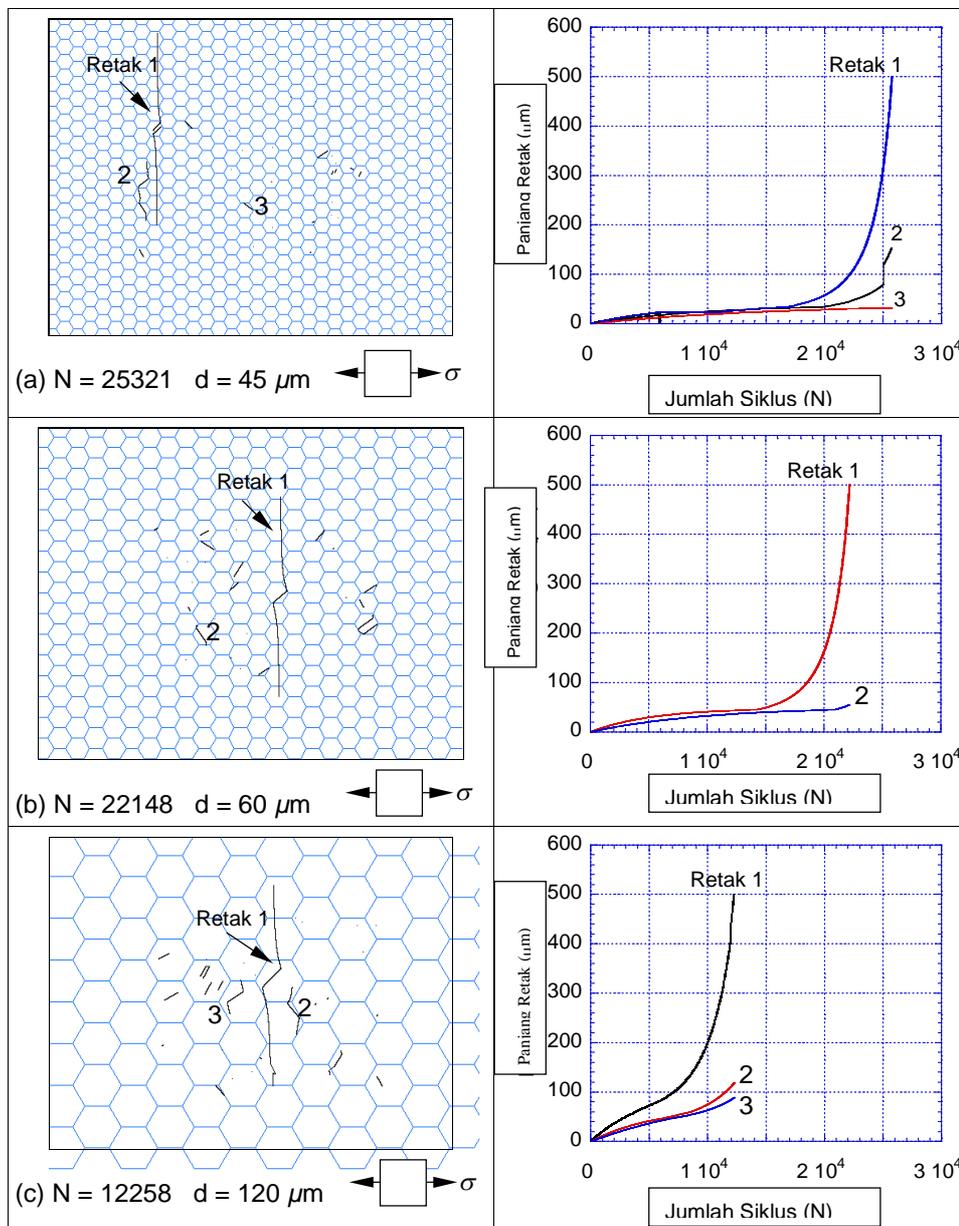
garis kurva (garis regresi) dengan data pengujian memiliki hubungan yang erat. Nilai koefisien korelasi berkisar antara 0 hingga 1. Semakin dekat dengan 1 maka nilai perkiraan berdasarkan kurva yang kita buat semakin dapat dipercaya. Secara kuantitatif dinyatakan bahwa [14],

$0,90 < R < 1,00$: hubungan sangat kuat

$0,70 < R < 0,90$ hubungan kuat

$0 < R < 0,50$ hubungan lemah dan sangat lemah

Nilai koefisien korelasi menunjukkan bahwa hubungan antara besar butir dan kuat luluh dapat diwakili oleh garis regresi pada Gambar 7 dan persamaan (14) di atas dengan keterkaitan hubungan yang sangat kuat.



Gambar 8. Gambar simulasi dan kurva hubungan antara panjang retak dan jumlah siklus beban pada berbagai ukuran butir $\sigma = 254$ MPa, pembebanan aksial tarik tekan.

Hasil Simulasi

Simulasi pengaruh besar butir terhadap umur fatik dilakukan dengan data masukan sebagai berikut.

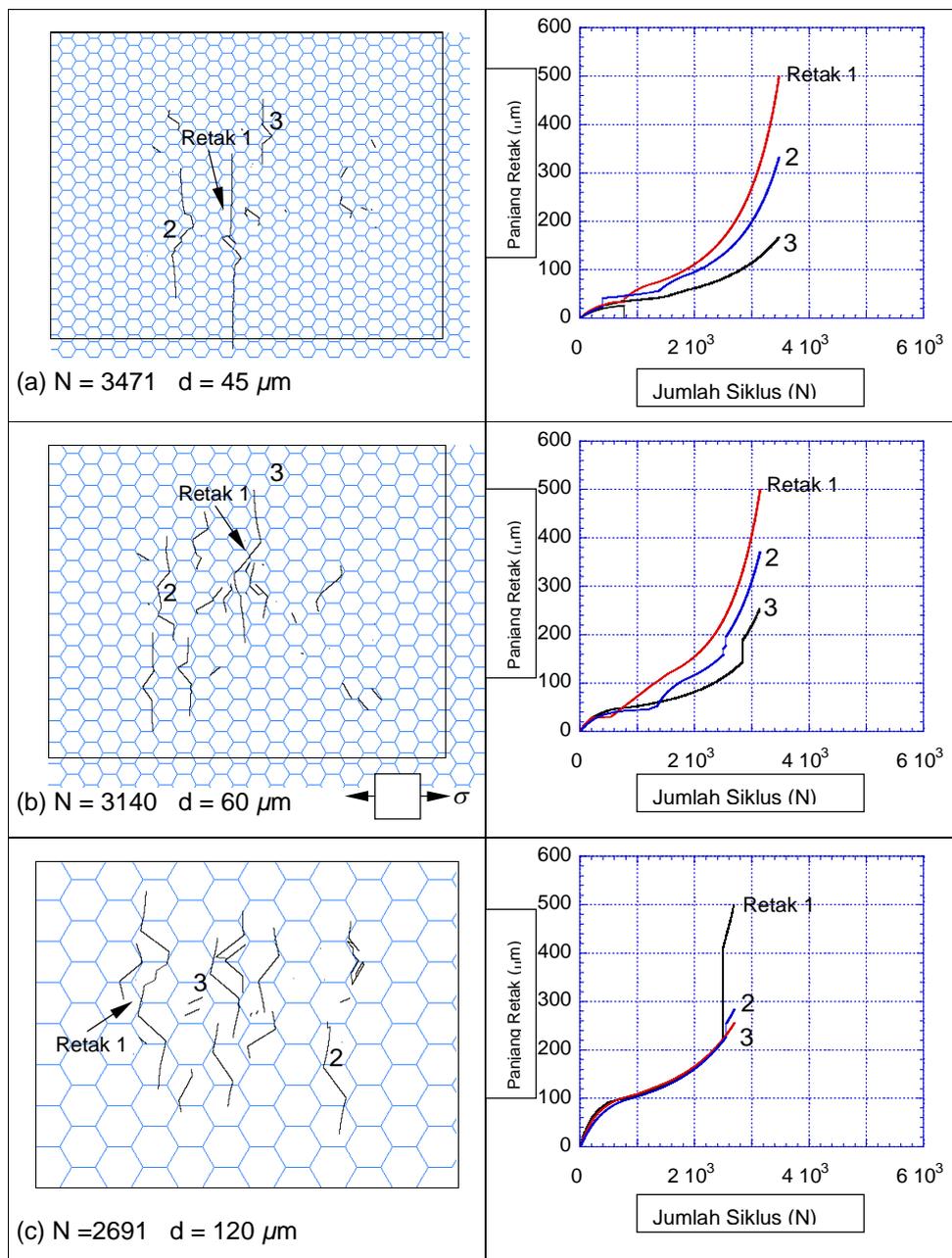
- Amplitudo tegangan $\sigma_a = 254$ MPa dan 330 MPa
- Pembebanan = tarik tekan aksial
- Kriteria kegagalan (akhir simulasi) $a = 500$ mm

Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan perambatan retak dalam butir akibat beban aksial tarik tekan untuk amplitudo $s_a = 254$ dan 330 Mpa. Retak mula-mula merambat dengan arah $j = \pm 45^\circ$ sebagai retak geser dan selanjutnya berambat tegak lurus tegangan nominal. Frekuensi penggabungan retak tampak lebih sering pada tegangan lebih tinggi dibanding tegangan yang lebih

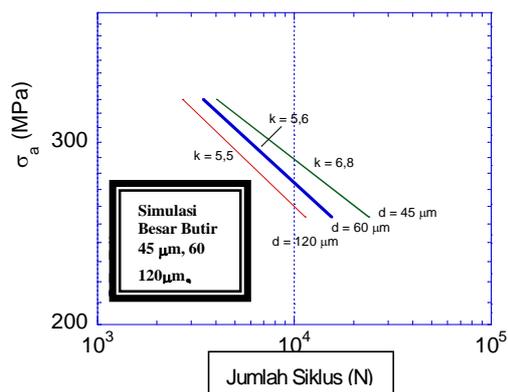
rendah. Dari sini dapat dijelaskan bahwa retak mikro yang bergabung akibat tegangan yang lebih tinggi juga meningkat.

Gambar 10 menunjukkan bahwa dengan peningkatan besar butir umur (ketahanan fatik) menurun, sehingga pengaruh besar butir pada daerah fatik siklus tinggi dominan. Penyebab dari hal tersebut adalah hambatan strukturmikro (batas butir) akibat meningkatnya ukuran butir berkurang. Perambatan retak pada butir yang lebih besar berlangsung lebih cepat dibanding pada butir-butir yang lebih kecil, lihat Gambar 8.

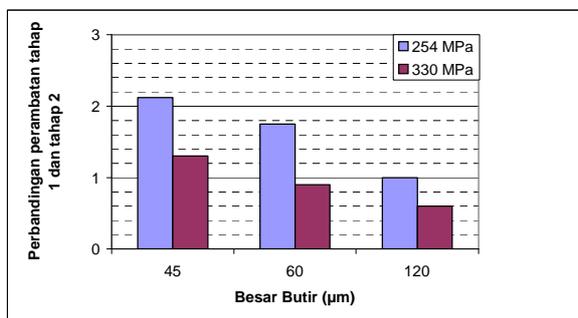
Pada besar butir yang lebih kecil (45 mm) perambatan retak didominasi oleh perambatan



Gambar 9. Gambar simulasi dan kurva antara panjang retak dan jumlah siklus beban pada berbagai ukuran butir $\sigma = 330$ MPa, pembebanan aksial tekan



Gambar 10. Kurva S-N Hasil Simulasi untuk Ukuran Butir yang Berbeda dengan Pembebanan Tarik Tekan



Gambar 11. Rasio Perbandingan antara Perambatan Retak Tahap 1 dan Tahap 2 pada masing-masing Ukuran Butir

retak tahap 1, sedangkan pada ukuran butir yang lebih besar (120 μm) tahap perambatan yang paling dominan adalah perambatan retak tahap 2. Berkurangnya ketahanan fatik akibat peningkatan ukuran butir dalam simulasi telah dibuktikan berdasarkan simulasi dan eksperimen serta penelitian lain [15, 16].

Gambar 11 menunjukkan bahwa dengan berkurangnya pembebanan, fraksi kerusakan pada tahap 1 bertambah. Peningkatan fraksi kerusakan tahap 1 pada besar butir yang lebih kecil cenderung bertambah di banding pada ukuran butir yang lebih besar. Hal ini menyebabkan gradien kemiringan kurva S-N pada ukuran butir yang lebih kecil lebih landai dibanding ukuran diameter yang lebih besar.

Menurut Luetic (17) butiran yang lebih kecil memiliki peranan penting dalam menghambat perambatan retak mikro. Pada umur fatik hingga 104 siklus, fraksi umur bisa dibagi menjadi 2 bagian yang sama antara kerusakan yang diakibatkan untuk perambatan retak mikro tahap 1 dan perambatan retak tahap 2. Penurunan ukuran butir mengakibatkan pengurangan jarak terhadap hambatan strukturmikro, sehingga tahanan terhadap perambatan retak tahap 1 meningkat.

Keadaan ini dapat dijelaskan secara memuaskan melalui simulasi ini, yang menerangkan bahwa perambatan retak tahap 1 dan tahap 2 merupakan bagian menentukan dalam menentukan umur fatik. Penurunan besar butir menyebabkan bagian

perambatan retak tahap 1 meningkat sehingga meningkatkan umur fatik.

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan besar butir menyebabkan penurunan kekerasan, penurunan kuat luluh serta kekuatan fatik.
2. Persamaan Hall-Pecht dapat diterapkan pada material baja karbon rendah yang telah mengalami *annealing*.
3. Program simulasi perambatan retak fatik mikro yang dibuat dapat menerangkan fenomena penurunan kekuatan fatik akibat peningkatan ukuran butir pada logam.

UCAPAN TERIMAKASIH

Kami mengucapkan terimakasih, kepada: Bapak Dr. Ing. Amir Partowiyatmo, dukungannya dalam kegiatan penelitian ini. Ir. Sekean yang telah membantu selama penelitian ini berlangsung. Prof. Dr Ing. H. Zenner dari TU Clausthal Germany dan Dr. Ing Kurt Poetter dari BMW AG. atas saran dan pertimbangannya dalam pembuatan program simulasi.

DAFTARACUAN

- [1]. FRENCH, D.N, *Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers*, John Wiley & Sons, New York,(1983) 28-30
- [2]. E.O. HALL, *Proc Phys. Soc. London*, **643**, (1951) 747
- [3]. N. J. PETCH, NJ, *J. Iron Steel Inst. London*, **173**, (1953)25
- [4]. TABOR, D., *The Hardness of Metals*, Oxford University Press, New York, (1951) 67-76
- [5]. DIN 501009 Werkstoffprueffung, Dauerschwing, Versuch, Begriffe, Zeichen, Duerchfuehrung, Auswertung (1978)
- [6]. Gudehus, H., H. Zenner, *Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, VBFeh, VDEh*, Düsseldorf (1995)
- [7]. ASTM Standards , Section 3. Vol 3.01, Metals, Mechanical Testing: Elevated and Low Temperature Tests, Metalography, E112, ASTM, Easton MD, USA, (1999)
- [8]. SUHARTONO, H.A., K. POETTER, A. SCHRAM, H. ZENNER, "Modeling of Short Crack Growth Under Biaxial Fatigue: Comparison Between Simulation and Experiment", *Multiaxial Fatigue and Deformation, STP 1387, ASTM, Philadelphia*, (2000)

- [9]. MILLER, K-J., Metal Fatigue-Past, Current and Future, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, (1991)
- [10]. HOBSON, P.D., M. W. BROWN, E. R. DE LOS RIOS, *Two Phases of short Crack Growth in medium Carbon Steel*, The Behaviour of short Fatigue Cracks, EGF Pub. 1, K.J.Miller and E.R. de los Rios, Ed., London, (1986) 441-459
- [11]. TAYLOR, D., J.F. KNOTT, Fatigue Crack Propagation Behaviour of Short cracks; The effect of Microstructure, *Fatigue Fracture Engineering Materials Structures* **4** (1981) 147
- [12]. SOCIE, D., S. FURMAN, *Fatigue Damage Simulation Models for Multiaxial Loading*, Fatigue 96, Sixth International Fatigue Congress, G. Lütjering and H. Nowark, Ed., Berlin, Germany, (1996) 967-976
- [13]. HUECK, M, THRAUER, L., W. SCHUETZ, *Berechnung von Syntetische Woehlerlinien fuer Bauteile aus Stahlguss und Grauguss*, Berich Nr. ABF11, VDEh, Duesseldorf, (1991)
- [14]. BUDIONO, W. KOSTER, *Statistika dan Probabilitas*, PT Remaja Rosdakarya, Bandung, (2001) 180-185
- [15]. EDGAR, A., JR. STARKE, G Lütjering: Cyclic Plastic Deformation and Microstructure, in Fatigue and Microstructure, American Society for Metals, Metals Park Ohio, (1979) 225
- [16]. LÜTJERING, G., A. GYSLER, Fatigue and Fracture of Aluminum Alloys, in Aluminum Transformation Technology and Applications, *Proceedings of the International Symposium at Puerto Madryn, Chubut, Argentina*, C. A. Pampillo, H. Biloni and D.E. Embury, Eds., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, (1980) 192
- [17]. LÜTJERING, G., A. GYSLER, J. ALBRECHT, Influence of Microstructure on Fatigue Resistance. In G. Lütjering and H. Nowack, (Eds.): *Fatigue 96, Sixt International Fatigue Congress*, Berlin, Germany, (1996) 967-976