

PENGARUH REMELTING TERHADAP LAJU PERAMBATAN RETAK PADUAN ALUMINIUM

Oleh

Aris Budiyo dan Jamasri
Staf Pengajar FT UNNES dan UGM

Abstract

The purpose of this research is to observe the effect of remelting on fatigue crack growth rates of the aluminum alloys. The material used in this research was selected aluminum scraps. The material was melt and cast at temperature of 745°C in the metal molding, then was made specimen according to ASTM E.647. The remelting was done three times at the same condition. The fatigue crack growth rate testing was performed in a room temperature condition with a constant load amplitude and the load ratio was maintained to be 0,3.

The experiment result show that remelting can increase fatigue crack growth rates which was shown by increasing of n exponential values (1st remelting was 4,4285 MPa.m^{0,5}, 2nd 4,5562 MPa.m^{0,5}, and 3rd 4,6078 MPa.m^{0,5})

Key words: remelting, fatigue crack growth rates, aluminum alloys

PENDAHULUAN

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai banyak keunggulan di antaranya adalah sifat mekanik, ketahanan korosi dan hantaran listrik yang baik. Aluminium dipergunakan secara luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga, tetapi juga dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, otomotif, kapal laut, konstruksi dan lain-lain. Bahkan di dunia otomotif aluminium merupakan material yang menarik untuk menurunkan berat kendaraan, penggunaan aluminium diharapkan dapat menekan kenaikan bahan bakar dan material ini juga mudah didaur ulang (*recyclable*) (Gaspari, 1999). Untuk mendapatkan peningkatan kekuatan mekanis, biasanya logam aluminium dipadukan dengan unsur Cu, Si, Mg, Ti, Mn, Cr, Ni, dan sebagainya.

Dalam proses pengecoran di industri kecil khususnya, tidak semua menggunakan bahan baku murni (*aluminum ingot*), tetapi memanfaatkan aluminium sekrap ataupun *reject materials* dari peleburan sebelumnya untuk dituang ulang (*remelting*). Hasil pengecoran industri kecil misalnya pelek, pada saat digunakan mengalami beban berulang dan kadang-kadang beban kejut sehingga peralatan tersebut harus mendapatkan jaminan terhadap kerusakan akibat retak lelah, sehingga aman dalam penggunaan atau bahkan mempunyai usia pakai (*life time*) lebih lama. Meskipun teknologi dan alat yang digunakan serba terbatas namun karena penggunaannya sebegitu luas maka perlu diteliti secara mendalam untuk bisa memperkirakan umur material akibat retak lelah.

Broek (1986) dalam bukunya menuliskan bahwa sebagian besar kerusakan konstruksi disebabkan oleh beban berulang atau berfluktuasi. Jika fluktuasi tegangan ini cukup besar dan berulang-ulang, kegagalan struktur dapat terjadi walaupun tegangan maksimum yang terjadi pada elemen struktur tersebut lebih kecil dibandingkan dengan kekuatan materialnya. Kegagalan ini dikatakan sebagai fatik atau kelelahan. Kelelahan adalah proses peretakan kemudian merambat di bawah beban yang berulang atau berfluktuasi.

Peleburan logam atau paduan logam adalah sebuah awal fenomena penting pada proses solidifikasi. Oleh sebab itu pengembangan teori dan penelitian masalah tersebut terus dikembangkan. Neff (2002) dalam papernya menjelaskan bahwa gas hidrogen yang dapat larut pada aluminium cair yang menyebabkan porositas pada pengecoran. Daya larut hidrogen meningkat bila temperatur naik. Dijelaskan pula bahwa tidak semua porositas diakibatkan oleh gas hidrogen tetapi disebabkan pula oleh penyusutan. Penyusutan yang terjadi pada saat aluminium membeku sebesar 6% dari volume ketika aluminium bertransformasi dari cair ke padat. Demikian juga Avyle, dkk (1998) menjelaskan bahwa produksi ingot komersial secara langsung memerlukan urutan satu atau lebih proses *remelting* termasuk

vacuum arc remelting (VAR), *electroslag remelting* (ESR), atau *hearth melting*. Semua proses digunakan untuk menghasilkan ingot yang berkualitas tetapi dapat juga sebagai sumber cacat.

Kobayashi, dkk (1999) dalam penelitiannya pada pengaruh mikrostruktur terhadap inisiasi retak lelah dan perambatan retak sifat paduan tuang Al-Si-Cu menyimpulkan bahwa: (1) inisiasi retak lelah ditemukan pada cacat penuangan, terutama di dekat permukaan spesimen. Hubungan antara *fatigue life* dan cacat penuangan pada bagian retak awal ditentukan dengan hubungan $\Delta K_0 - N_f/A^{1/2}$. (2) umumnya, ketahanan lelah lebih tinggi pada kandungan Si yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini pada kandungan Si lebih tinggi dapat memperbaiki cacat penuangan. (3) konsentrasi tegangan lebih tinggi pada partikel Si yang kasar akan menghasilkan laju perambatan retak lebih tinggi

Untuk mendapatkan sifat-sifat mekanis yang diinginkan maka aluminium dipadu dengan berbagai unsur seperti tembaga, silisium, magnesium, mangan, nikel dan sebagainya.

Peleburan aluminium tuang dapat dilakukan pada tanur krus besi cor, tanur krus dan tanur nyala api. Aluminium yang dimasukkan pada dapur terdiri dari sekrap (*remelt*) dan aluminium ingot. Aluminium paduan tuang ingot didapatkan dari peleburan

primer dan sekunder serta pemurnian. Praktek peleburan yang baik mengharuskan dapur dan logam yang dimasukan dalam keadaan bersih (Heini dkk, 1981).

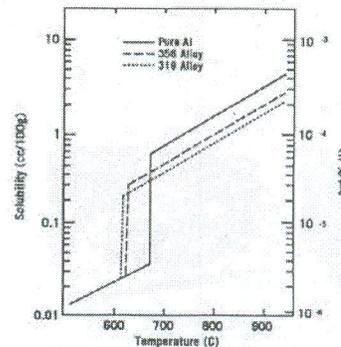
Untuk menghemat waktu peleburan dan mengurangi kehilangan karena oksidasi lebih baik memotong logam menjadi potongan kecil yang kemudian dipanaskan mula. Kalau bahan sudah mulai mencair, fluks harus ditaburkan untuk mengurangi oksidasi dan absorpsi gas. Selama pencairan, permukaan harus ditutup fluks dan cairan diaduk pada jangka waktu tertentu untuk mencegah segregasi. (Surdia dan Chijiiwa, 1991). Adapun untuk tuang ulang (*remelting*) yaitu material hasil peleburan di atas dilebur kembali.

Hasil pengecoran terdapat kekosongan, inklusi, dan ketidaksempurnaan yang mempengaruhi kemampuan mekanis. Cacat hasil pengecoran diantaranya disebabkan oleh:

1. Cacat gas

Apabila diberi kesempatan, paduan aluminium akan menyerap gas hidrogen. Peningkatan temperatur sebuah efek yang besar pada kelarutan maksimum dari hidrogen pada aluminium, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1. Pada titik lebur tiba-tiba terjadi kenaikan kelarutan hidrogen pada aluminium sampai dicapainya temperatur penguapan. Akibat pendinginan dan pembekuan gas akan terjebak dalam aluminium

yang menyebabkan *pinholes* dan porositas gas secara mikroskopis (Beeley, 1982)



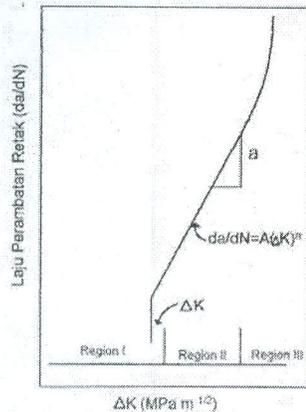
Gambar 1. Pengaruh temperatur pada kelarutan hidrogen dalam aluminium

2. Cacat penyusutan (*shrinkage*)

Yaitu cacat yang disebabkan kontraksi volume di dalam larutan dan pada saat pembekuan. Cacat penyusutan diinkasikan sebagai kekurangan pengisian logam pada suatu tempat yang dibutuhkan pada akhir pembekuan. Konsekuensinya, porositas yang diakibatkan mengikuti bagian pembekuan dan batas dendrit, serta porositas karena penyusutan (*shrinkage porosity*) ini kasar dan pada bagian tepi tidak rata. Berbeda dengan porositas karena gas (*gas porosity*) bentuknya lebih teratur dan kerap kali bundar.

Hubungan antara karakteristik perambatan retak dengan LEFM (*Linear Elastic Fracture Mechanics*) pada umumnya diberikan dalam bentuk kurva log-log (*sigmoidal*) da/dN versus ΔK .

Laju perambatan retak $\left(\frac{da}{dN}\right)$, sebagai fungsi dari ΔK dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2. Kurva perambatan retak da/dN vs ΔK (skala log-log) (Rofle, 1977)

Secara umum karakteristik perambatan retak fatik dapat dibagi menjadi tiga daerah yaitu daerah I yang disebut daerah ambang, daerah II yang disebut daerah linier dan daerah III yang disebut daerah tidak stabil.

Daerah II menunjukkan hubungan linier antara $\log \frac{da}{dN}$ dan $\log \Delta K$, pada daerah

$$K_I = \frac{P}{BW^{3/2}} \left[2 + \frac{a}{W} \left[0,866 + 4,64 \left(\frac{a}{W} \right) - 13,32 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \right] \dots \dots \dots (3)$$

Persamaan (3) mempunyai akurasi 0,5% untuk harga $0,2 < \frac{a}{W} < 1,0$

Biasanya dalam pengujian fatik digunakan variabel pembanding tegangan atau beban, yaitu:

$$R = \frac{P_{min}}{P_{maks}} \dots \dots \dots (4)$$

dengan variabel R ini, maka dalam suatu pengujian biasanya hanya diperlukan tambahan variabel tegangan atau beban maksimum.

ini berlaku persamaan Paris sebagai berikut (Sharp, 1996):

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \dots \dots \dots (1)$$

dimana

n = koefisien arah kurva

A = koefisien yang dapat dicari dengan menarik garis lurus ke harga $\Delta K = 1$ MPa.m^{1/2}

a = panjang retak

N = jumlah siklus

ΔK = perubahan faktor intensitas tegangan

Harga ΔK merupakan selisih faktor intensitas tegangan maksimum dan minimum yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Delta K = K_{maks} - K_{min} \dots \dots \dots (2)$$

Untuk pengujian dengan spesimen model CTS maka besarnya faktor intensitas tegangan adalah:

METODE PENELITIAN

Bahan yang diteliti adalah paduan aluminium dari sekrap (bekas) pelek mobil terpilih yang tersedia sebagai bahan baku pengecoran untuk pembuatan pelek dan asesoris sepeda motor di industri pengecoran pelek "Kripton Gama Jaya" Banguntapan Bantul. Setelah diremelting menghasilkan bahan dengan komposisi kimia:

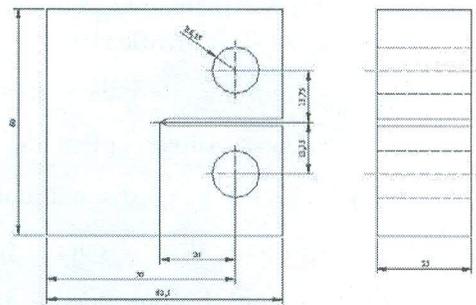
Tabel 1. Komposisi kimia paduan aluminium hasil *remelting* (%berat)

| Bahan | Al | Si | Fe | Cu | Mn | Mg |
|----------|-------|------|--------|--------|--------|--------|
| Rem. I | 91,99 | 6,96 | 0,3385 | 0,1247 | 0,0315 | 0,2387 |
| Rem. II | 92,08 | 6,85 | 0,3561 | 0,1251 | 0,0321 | 0,2294 |
| Rem. III | 91,99 | 6,97 | 0,3371 | 0,1240 | 0,0313 | 0,2217 |

Peralatan utama yang digunakan adalah dapur peleburan non ferro terbuat dari kowi tanah dengan pemanasan burner minyak tanah dan mesin uji tarik universal *Servopulser* dilengkapi *traveling microscope*.

Proses pengecoran untuk membuat specimen dengan menggunakan metoda *Y block casting* yaitu specimen diambil dari hasil pengecoran bagian bawah (Griswold dan Stephens, 1987). Bahan sekrup paduan aluminium dilebur sampai suhu 724°C, suhu tersebut dipantau dengan alat *digital thermo-couple* dan suhu dipertahankan hingga selesai pengecoran. Cetakan yang digunakan adalah cetakan logam dari besi cor, sebelum cairan logam dituang pada cetakan terlebih dahulu cetakan dipanaskan hingga mencapai 300°C. Waktu yang diperlukan untuk menuang antara 13 sampai 15 detik dengan jarak 1,5 m (dapur dan cetakan). Kecepatan tuang rata-rata 0.083 kg/dt (pada pengamatan, untuk menuang 0,5 kg diperlukan waktu rata-rata 6 detik). Waktu pendinginan dalam cetakan rata-rata 60 detik, setelah itu logam dikeluarkan dari cetakan untuk didinginkan pada suhu udara. Kondisi seperti ini diberlakukan sama terhadap remelting pertama, kedua dan ketiga. Selanjutnya dibuat specimen

pengujian standar ASTM E.647 dengan ukuran seperti gambar 3. Untuk membuat takik dilakukan dengan menggunakan mesin *Electro Discharge Machine* (EDM).



Gambar 3. CT Spesimen ASTM E.647

Spesimen diuji secara dinamik dengan mesin uji tarik universal *Servopulser* kontrol tertutup Shimadzu. Pola pembebanan yang digunakan adalah sinusoidal dengan frekuensi berkisar 5 – 15 Hz dan pada fluktuasi beban konstan. Pengujian menggunakan beban amplitudo konstan dilakukan terhadap seluruh specimen dan menggunakan perbandingan beban (R) 0,3. Beban maksimum alat uji yang digunakan 2000 kg dan beban dinamik maksimum (P_{maks}) pengujian ditentukan sebesar 600 kg (30% pembacaan pada alat uji) sedangkan beban dinamik minimum (P_{min}) ditentukan berdasarkan perbandingan beban (R) 0,3 yaitu 180 kg (9% pembacaan

alat uji). Perubahan panjang retak dipantau dengan dua buah *traveling microscope* (kanan-kiri) dibantu pencahayaan lampu dan pada spesimen diberi *tip-ex* untuk memudahkan pembacaan. Pencatatan tiap 5 strip (0,25 mm) skala *traveling microscope* dilakukan terhadap retak salah satu sisi (a_1) sebagai acuan dan jumlah siklus (N) sedangkan retak di sisi yang lain (a_2) mengikuti. Pengujian dilakukan hingga spesimen rusak (*failure*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian perambatan retak dengan fluktuasi beban konstan dan $R=0,3$ terhadap tiga kondisi retak menghasilkan data berupa pertambahan panjang retak dan jumlah siklus. Data ini kemudian diubah menjadi panjang retak rata-rata, perubahan panjang retak (da), pertambahan siklus (dN), perubahan faktor intensitas tegangan (ΔK) dan laju perambatan retak (da/dN) menggunakan rumus (3). Data ini selanjutnya diubah menjadi grafik seperti ditunjukkan pada gambar 4 sampai dengan gambar 11.

Gambar 4, adalah grafik hubungan antara pertambahan panjang retak dengan jumlah siklus untuk retak pada *remelting* I, retak mulai merambat setelah mengalami pembebanan sekitar 62123 siklus dan perambatan panjang semakin cepat dengan bertambahnya siklus. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya faktor intensitas tegangan dengan

bertambahnya panjang retak. Oleh karena itu untuk memprediksi laju perambatan retak dibuat grafik dengan skala log-log agar hubungan anatar laju perambatan retak dengan perubahan faktor intensitas tegangan menjadi linier yang terjadi pada daerah II seperti ditunjukkan pada gambar 2. Dari persamaan (1) dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^n$$

$$\log \frac{da}{dN} = \log A + n \log (\Delta K) \dots\dots\dots (5)$$

$$y = b + nx$$

dengan demikian harga A dan n dapat ditentukan dari grafik da/dN terhadap ΔK dengan skala log-log. Pada gambar 5 adalah grafik yang dimaksud dengan menggunakan data pada gambar 4. Laju perambatan retak pada daerah II dapat diketahui untuk setiap perubahan ΔK bila harga A dan n telah ditentukan.

Untuk memprediksi jumlah siklus yang diperlukan untuk menambah panjang retak dari awal sampai panjang yang diijinkan dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^n$$

$$da = A(\Delta K)^n dN \dots\dots\dots (6)$$

$$\int dN = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{A(\Delta K)^n}$$

Untuk 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 perubahan sifat mekanik bahan, dalam hal ini pengaruh *remelting*. Dari hasil analisis untuk gambar 5 diperoleh harga $A = 4,4285E-12$ dan $n = 4,4285$ dengan dimensi da/dN dalam m/siklus, sedangkan ΔK dalam $MPa.m^{0,5}$.

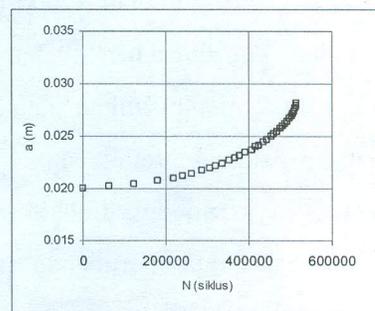
Grafik serupa dengan gambar 4 ditunjukkan dalam gambar 6 dan 8 untuk retak pada *remelting* II dan *remelting* III, kalau dilihat sepertinya mempunyai lengkung eksponensial, tetapi perbedaannya adalah pada jumlah siklus pada saat patah. Sedangkan gambar 7 dan 9 adalah grafik da/dN dan ΔK skala log-log serupa dengan gambar 5, grafik ini dianalisis seperti grafik pada gambar 5 untuk mendapatkan harga A dan n . Harga-harga A dan n dari hasil analisis ditunjukkan dalam tabel 2.

Tabel 2. Harga konstanta A dan eksponensial n

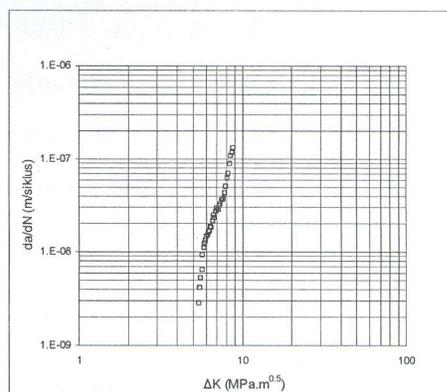
| Kondisi retak | Harga n | Harga A |
|---------------|-----------|------------|
| Remelting I | 4,4285 | 4,9612E-12 |
| Remelting II | 4,5562 | 4,4962E-12 |
| Remelting III | 4,6078 | 2,6563E-12 |

Dari tabel 2 terlihat bahwa harga n naik setelah *diremelting* 2 kali sampai 3 kali, menunjukkan bahwa proses *remelting* dapat menurunkan keuletan material. Dengan menurunnya keuletan maka ketahanan bahan terhadap retak juga turun, akibatnya laju perambatan retak naik yang tunjukkan dengan oleh naiknya harga n . Harga n

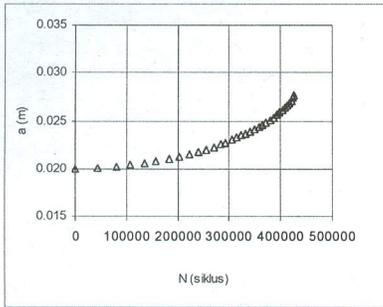
merupakan koefisien arah dari grafik 5, 7 dan 9, maka jelas bahwa naiknya harga n akan menurunkan harga A . Hal ini pernah diungkapkan oleh Kobayashi, dkk (1999) dalam penelitiannya pada pengaruh mikrostruktur terhadap inisiasi retak leleh dan perambatan retak sifat paduan tuang Al-Si-Cu menyimpulkan bahwa: (1) inisiasi retak leleh ditemukan pada cacat penuangan, (2) konsentrasi tegangan lebih tinggi pada partikel Si yang kasar akan menghasilkan laju perambatan retak lebih tinggi



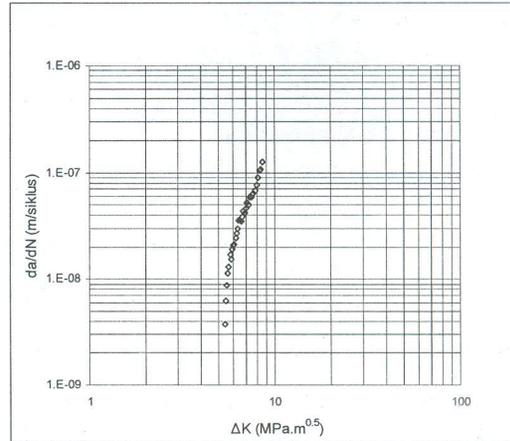
Gambar 4. Kurva pertambahan panjang retak terhadap jumlah siklus untuk *remelting* I



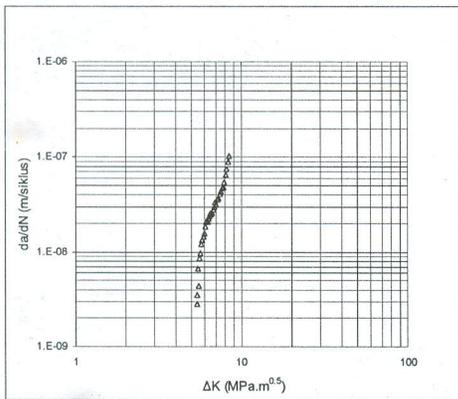
Gambar 5. Kurva log-log laju perambatan retak terhadap perubahan faktor intensitas tegangan untuk *remelting* I



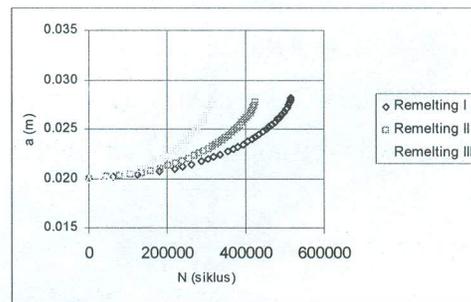
Gambar 6. Kurva pertambahan panjang retak terhadap jumlah siklus untuk *remelting* II



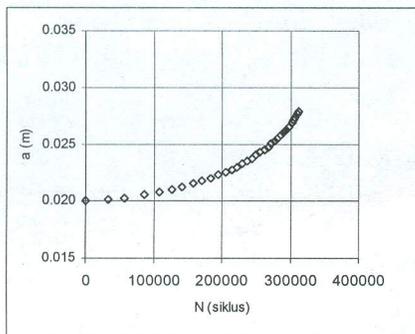
Gambar 9. Kurva log-log laju perambatan retak terhadap perubahan faktor intensitas tegangan untuk *remelting* III



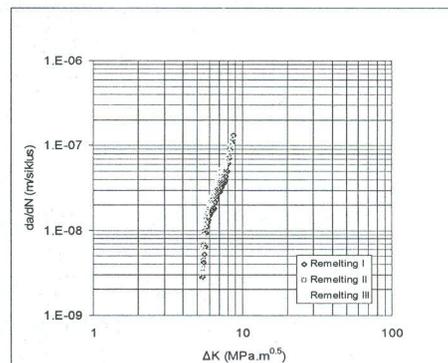
Gambar 7. Kurva log-log laju perambatan retak terhadap perubahan faktor intensitas tegangan untuk *remelting* II



Gambar 10. Kurva pertambahan panjang retak terhadap jumlah siklus untuk *remelting* I, II, III



Gambar 8. Kurva pertambahan panjang retak terhadap jumlah siklus untuk *remelting* III



Gambar 11. Kurva log-log laju perambatan retak terhadap perubahan faktor intensitas tegangan untuk *remelting* I, II, III

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian di atas dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Persamaan Paris dapat diaplikasikan pada bahan paduan aluminium untuk karakterisasi laju perambatan retak dari *remelting* pertama, kedua dan ketiga.
2. *Remelting* dapat meningkatkan laju perambatan retak paduan aluminium yang ditunjukkan dengan kenaikan harga eksponensial n dan konstanta A pada persamaan Paris, yaitu *remelting* pertama $n=4,4285, A=4,9612E-12$, *remelting* kedua $n=4,5562, A=4,4962E-12$ dan *remelting* ketiga $n=4,6078, A=2,6563E-12$.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM, 1991, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rate*, Annual Book of ASTM Standard, Parts 10, Philadelphia
- Avyle, J.A.V.D., Brooks, J.A. dan Powell, A.C., 1998, *Reducing Defects in Remelting Processes for High-Performance*, JOM, March 1998, pp 22-49
- Barsom, J.M. dan Rolfe, S.T., 1999, *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*, Third Edition, Butterworth-Heinemann, Philadelphia
- Beelley, P.R., 1982, *Foundry Technology*, Butterworths Scientific, London
- Broek D., 1986, *Elementary Engineering Fracture Mekhanics*, Martinus Nijhoff Publiser, Dodrect, Nederland.
- Griswold Jr., F.D. dan Stepens, R.I., 1987, *Comparasion of Fatigue Properties of Nodular Cast Iron Production and Y-block Casting*, Int J Fatigue, January 1987, pp 3-10
- Heini, R.W., Loper Jr., Rosenthal, C.R. dan Philip C., 1981, *Principles of Metal Casting*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi
- Kobayashi T., Ito T., Yao Q. dan Fatahalla N., 1999, *Fatigue Properties and Microstructure of Al-Si-Cu System Casting Alloys*, Materials Science Technology, Vol. 15, September, pp. 1037
- Neff, D.V., 2002, *Understanding Aluminum Degassing*, Modern Casting, May 2002, p. 24-26
- Rolfe, T.S. dan Barsom, M. J., 1977, *Fracture and Structure Control*, Prentice - Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Sharp, M.L., Nordmark, G.E. dan Menzemer, C.C., 1996, *Fatigue Design of Aluminum Components and Structures*, McGraw-Hill, New York.
- Surdia, T. dan Chijjiwa K., 1991, *Teknik Pengecoran Logam*, PT Pradnya Paramita, Jakarta.