

## Tinjauan Investigasi Penyebab Jalur Perambatan Retak-Lelah Unik Mode-Campuran I+II pada Pelat Aluminium Murni Komersial

Yudy Surya Irawan

Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya  
Jalan MT. Haryono 167, Malang, 65145  
E-mail : yudysi@hotmail.com

### Abstrak

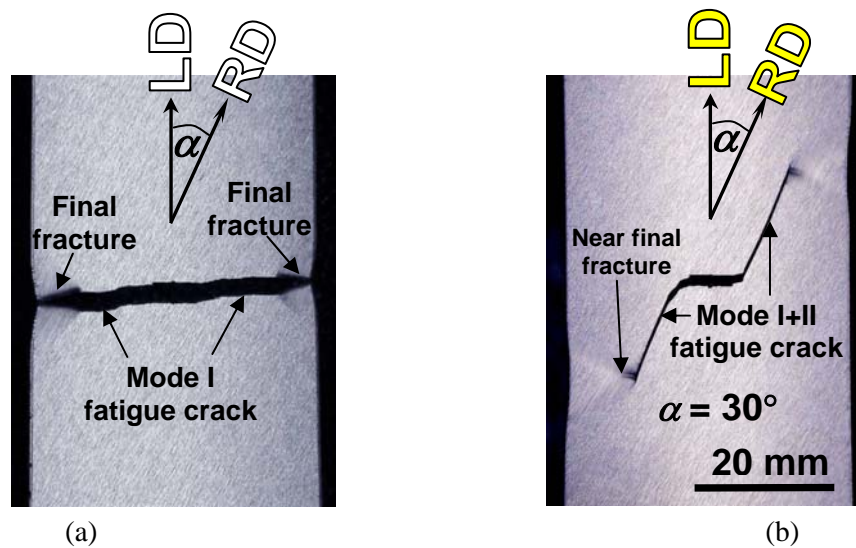
Makalah ini meninjau usaha-usaha yang telah dilakukan dalam menginvestigasi penyebab dari perambatan jalur retak lelah unik di spesimen *Center Cracked Tension* (CCT) dari pelat aluminium murni komersial. Pada pelat ini retak lelah tidak merambat ke arah mode I seperti pada umumnya, namun merambat ke arah pengerolan sebagai retak mode campuran I dan II. Dari hasil pengujian retak lelah, ditemukan bahwa retak lelah merambat ke arah pengerolan yang membentuk arah sekitar 30 derajat terhadap arah pembebanan pada spesimen pelat aluminium murni komersial. Namun retak lelah tidak merambat ke arah pengerolan sebagai retak mode campuran I dan II pada spesimen yang telah dianil pada suhu 563 K selama 30 menit. Hasil pengujian mikrostruktur tidak menunjukkan adanya pengaruh bentuk mikrostruktur terhadap jalur perambatan retak. Namun, berdasarkan hasil pengujian kondisi kristal dari permukaan patahan retak dan gambar kutub menggunakan sinar X dapat diketahui bahwa terdapat tekstur kuat dari bidang geser aluminium, bidang (111) pada bidang arah pengerolan. Dari hasil ini dapat diklarifikasikan bahwa tekstur yang kuat dari bidang geser (111) yang berada di daerah tegangan geser maksimum menyebabkan retak lelah merambat ke arah pengerolan sebagai retak mode campuran I dan II.

Kata kunci: Aluminium, Jalur Perambatan Retak Lelah, Mikrostruktur, Tekstur Logam, Difraksi Sinar X

### Pendahuluan

Pada umumnya arah jalur perambatan retak lelah pada pelat hasil pengerolan dingin, tidak dipengaruhi oleh arah pengerolan terhadap arah pembebanan lelah. Sebagai contoh seperti ditunjukkan dalam Gbr.1(a), pada kasus retak lelah di spesimen *Center Cracked Tension* (CCT) dari pelat yang mendapat beban-lelah tarik, retak lelah umumnya merambat ke arah tegak lurus terhadap arah tegangan-utama maksimum atau ke arah mode satu (*mode I*), tanpa ada pengaruh dari arah pengerolan pada spesimen. Namun seperti ditampilkan dalam Gbr.1(b) untuk kasus spesimen aluminium murni komersial A1100P yang arah pengerolannya (RD, *Rolling Direction*) membentuk sudut sekitar 30 derajat terhadap arah pembebanan lelah (LD, *Loading Direction*), retak awal mode satu tidak terus merambat ke arah mode satu namun berbelok dari mode satu ke arah pengerolan sebagai retak mode campuran satu dan dua (*mixed mode I+II*). Ini merupakan fenomena jalur perambatan retak yang unik.

Untuk mengetahui penyebab dari fenomena ini, pengujian perambatan retak lelah dilakukan dengan menggunakan spesimen *Center Cracked Tension* (CCT) yang terbuat dari pelat aluminium murni komersial dengan arah sudut pengerolan yang bervariasi terhadap arah pembebanan lelah. Selain itu untuk mengetahui pengaruh dari bentuk dan ukuran mikrostruktur terhadap jalur perambatan retak lelah, spesimen juga dianil pada suhu tertentu. Jalur perambatan retak lelah diamati dengan menggunakan mikroskop. Selain itu pengujian mikrostruktur dan pengujian kondisi kristal logam dari spesimen dengan menggunakan difraksi sinar X juga telah dilakukan. Dalam makalah ini ditinjau kembali hasil-hasil pengujian tersebut berikut pemecahan penyebab dari fenomena perambatan retak lelah unik pada pelat aluminium murni komersial. Diharapkan akan menjadi informasi yang menunjukkan pentingnya penyelidikan pada skala mikro dalam mencari penyebab dari perilaku jalur perambatan retak lelah. Selain itu juga akan bermanfaat untuk memprediksi perambatan retak lelah serta menjamin kekuatan dan keamanan komponen yang menggunakan pelat terhadap perambatan retak lelah.



Gbr.1 (a) Suatu retak mode I pada pelat yang telah dirol .  
 (b) Retak lelah mode campuran I dan II pada pelat aluminium murni komersial.[Irawan,2006]

**Metodologi**

Material yang digunakan adalah pelat aluminium murni komersial A1100P-H24. Kekerasan dalam skala *Vickers* dari material spesimen adalah 46. Komposisi unsur-unsur kimia dari material ditunjukkan pada Tabel 1.

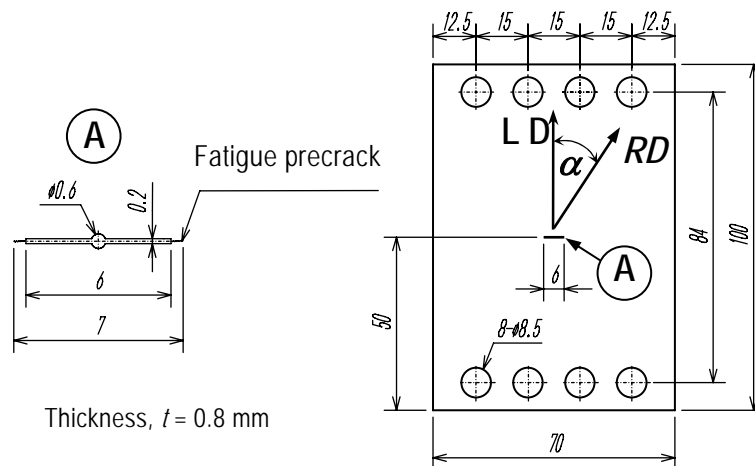
Tabel 1 Komposisi unsur-unsur kimia dari pelat A1100P-H24 [Irawan et.al, 2006].  
 (% massa)

Al	Si	Fe	Cu	Ti	Mn
98.94	0.34	0.54	0.12	0.04	0.02

Sedangkan sifat-sifat mekanis dari pelat aluminium murni komersial adalah 72 GPa untuk modulus elastisitas, 123 MPa untuk tegangan luluh, 127 untuk kekuatan tarik dan 0.35 untuk poisson ratio. Angka-angka ini merupakan hasil rata-rata dari pengujian tarik menggunakan spesimen yang memiliki arah pengerolan 0, 30, 45, 60, dan 90 derajat terhadap arah pembebanan. Dari hasil pengujian ini tidak menunjukkan sifat anisotropi yang besar pada modulus elastisitas dan poisson ratio. Selain itu kekuatan geser dari pelat pada arah pengerolan adalah 83.4 MPa yang mana lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan geser pada arah tegak lurus terhadap arah pengerolan yang sebesar 90.6 MPa.

Gambar 2 menunjukkan bentuk dan dimensi spesimen *Center Cracked Tension* (CCT) yang digunakan untuk pengujian perambatan retak lelah. Spesimen CCT memiliki sebuah celah (*slit*) di tengah dengan panjang 6 mm dan lebar 0.2 mm. Selain itu spesimen memiliki panjang 100 mm, lebar 70 mm dan tebal 0.8 mm. Arah pengerolan dibuat dengan arah 30 derajat seperti kondisi dimana fenomena ini pertama kali ditemukan [Hagiwara et.al, 1994]. Pengujian perambatan retak lelah menggunakan mesin uji lelah *SERVOPULSER* Lab 5 buatan Shimazu Seisakusyo. Beban lelah berupa gelombang sinus dengan tegangan maksimum  $\sigma_{max} = 45$  MPa, dengan rasio tegangan  $R=0.05$  dan frekuensi 30 Hz. Untuk memberikan retak awal sepanjang 7 mm, maka pra-retak lelah (*fatigue precrack*) mode I diberikan pada setiap ujung celah sepanjang 0.5 mm dengan kondisi pembebanan tegangan maksimum 40 MPa.

Kemudian untuk mengetahui efek dari bentuk dan ukuran butir kristal atau mikrostruktur terhadap jalur perambatan retak lelah pelat aluminium murni komersial dianil pada suhu 563 K selama 30 menit. Spesimen yang digunakan memiliki arah pengerolan 15, 30 dan 45 derajat



Gbr.2 Bentuk dan dimensi dari sebuah spesimen CCT [Irawan,2006]

(LD, Loading Direction: Arah pembebanan, RD, Rolling Direction: Arah pengerolan,  $\alpha$ : arah pengerolan terhadap arah pembebanan)

terhadap arah pembebanan dengan dimensi yang sama seperti pada Gbr.2. Beban leleh tegangan maksimum yang diberikan sebesar 45 MPa.

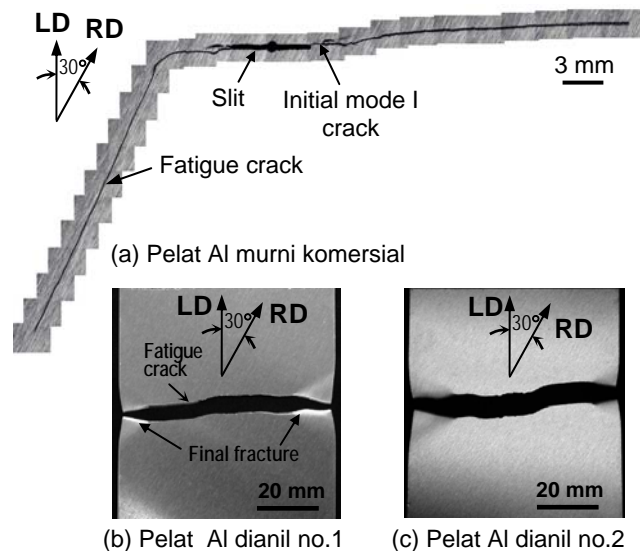
Selain itu, mikrostruktur dari spesimen diamati dengan menggunakan sebuah *scanning electron microscope* yang dilengkapi EPMA (*Electron Probe Micro Analyzer*). Gambar mikrostruktur diambil dengan metode gambar komposisi (*composition image method*) dari *Backscattered Electron Image* [Newby, 1990 dan Uchiyama, 1972].

Untuk mengetahui kondisi dari derajat tekstur logam pada pelat aluminium murni, peralatan difraksi sinar X digunakan dalam pengukuran kondisi kristal logam di atas permukaan patahan. Selain itu, metode difraktometer [Cullity, 2001 dan Nagashima, 1984] digunakan untuk mengukur gambar kutub dari bidang geser aluminium bidang (111) pada pelat tersebut.

### Hasil dan Pembahasan

Gambar 3(a) menunjukkan hasil pengujian perambatan retak leleh pada spesimen pelat aluminium murni komersial yang mana retak leleh merambat ke arah pengerolan sebagai retak leleh mode campuran I dan II. Pada kondisi pembebanan  $\sigma_{max}$  yang bervariasi juga menunjukkan hasil yang sama seperti dilaporkan dalam [Irawan, 2006]. Meskipun retak leleh tidak merambat ke arah pengerolan secara simetris seperti pada Gbr.1(b), namun mengingat tujuan dari eksperimen adalah untuk mencari penyebab dari merambatnya retak leleh ke arah pengerolan maka perhatian dipusatkan pada retak yang merambat ke arah pengerolan sebagai retak leleh mode campuran I dan II. Mengenai kondisi mulai berbeloknya retak leleh ke arah pengerolan telah dilaporkan bahwa retak mulai berbelok ke arah pengerolan di saat faktor intensitas tegangan mode I lebih besar atau sama dengan  $4.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  yang mana ditemukan dengan melakukan pengujian spesimen di bawah kondisi berbagai macam tegangan maksimum dan arah pengerolan [Irawan, 2006].

Sedangkan Gbr.3(b),(c) menunjukkan beberapa contoh gambar dari retak leleh pada spesimen yang telah dianil 563K selama 30 menit yang mana retak tidak merambat ke arah pengerolan namun merambat ke arah mode I. Hasil yang sama juga didapatkan pada spesimen yang memiliki arah pengerolan  $15^\circ$  dan  $45^\circ$  terhadap arah pembebanan. Dari hasil ini dapat diketahui bahwa dengan adanya pemanasan yang mana telah merubah kondisi struktur kristal dari



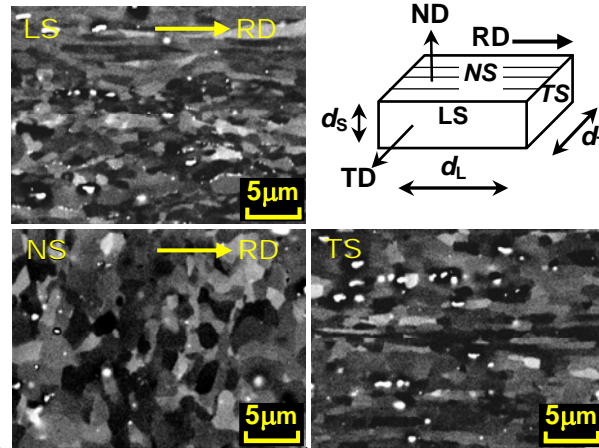
Gbr.3 Jalur perambatan retak lelah pada pelat aluminium murni komersial dan yang telah dianil dengan pembebanan  $\sigma_{max} = 45 \text{ MPa}$ ,  $R=0.05$  [Irawan, 2006].

spesimen, maka retak lelah tidak merambat ke arah pengerolan sebagai retak mode campuran I dan II namun sebagai retak mode I.

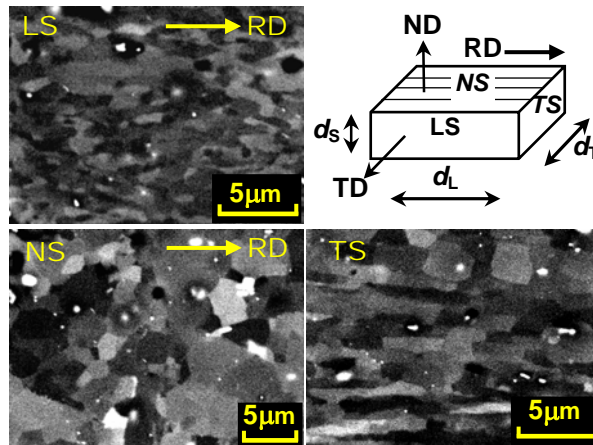
Mengingat diperkirakan adanya pengaruh dari ukuran butir terhadap jalur perambatan retak lelah, mikrostruktur dari spesimen pelat aluminium murni komersial dan yang telah dianil 563K selama 30 menit telah diambil. Pengambilan gambar mikrostruktur menggunakan metode gambar komposisi dari *backscattered electron image*. Gambar 4 dan 5 menunjukkan foto mikrostruktur dari tiga penampang utama dari spesimen pelat aluminium murni komersial dan yang telah dianil 563K selama 30 menit. Besar butir diukur berdasarkan metode memintas (*intercept method*) berdasarkan standar ASTM E-112 [ASTM, 2000]. Seperti ditunjukkan dalam Gbr.4 dan 5, pengukuran dilakukan pada ukuran butir pada arah memanjang  $d_L$ , ukuran butir pada arah tebal pelat  $d_S$ , dan ukuran butir pada arah melintang  $d_T$  yang muncul di masing-masing penampang normal pelat NS, penampang melintang pelat TS dan penampang memanjang pelat LS. Nilai rata-rata dari ukuran butir tersebut ditampilkan dalam Tabel 2. Sebagaimana diketahui dalam Tabel 2, ukuran butir dari pelat aluminium yang telah dianil mengalami penurunan sedikit, namun tidak didapatkan perbedaan yang besar di antara ukuran butir di kedua pelat yang berbeda tersebut. Sehingga dapat dianggap bahwa tidak ada pengaruh dari besar butir terhadap jalur perambatan retak lelah.

Selanjutnya, kemungkinan penyebab dari fenomena jalur perambatan retak ke arah pengerolan adalah sebagai berikut. Mengingat pelat aluminium komersial dibuat dengan proses pengerolan dingin, maka kemungkinan terdapat tekstur dalam pelat. Kemudian, fenomena ini juga dikarenakan oleh adanya mode geser atau mode II dari retak, oleh sebab itu terdapat kemungkinan adanya pengaruh dari tekstur bidang geser aluminium bidang (111). Adanya tekstur bidang geser (111) dalam pelat aluminium yang telah dirol juga telah dilaporkan [Nagashima, 1984], [Le May, 1970], [Hatch, 1984].

Untuk mengetahui keberadaan tekstur bidang geser dalam pelat, pertama pengukuran intensitas dari bidang kristal dengan menggunakan difraksi sinar X dilakukan pada permukaan patahan dari retak yang merambat ke arah pengerolan dan pada permukaan patahan dari retak yang merambat ke arah mode I di pelat yang dianil. Hasil pengukuran seperti ditunjukkan pada Gbr.6, pada permukaan retak yang merambat ke arah pengerolan, bidang geser aluminium (111) terdapat paling banyak bila dibandingkan dengan bidang kristal lain. Akan tetapi pada permukaan retak yang tidak merambat ke arah pengerolan atau merambat ke arah mode I di pelat yang telah dianil, terdapat banyak bidang kristal dengan derajat tekstur bidang kristal (111) lebih rendah dibandingkan permukaan retak yang merambat ke arah pengerolan. Dari sini dapat diketahui



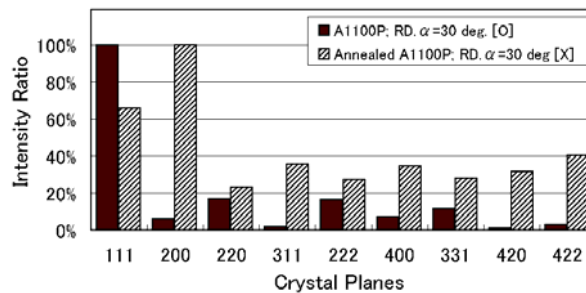
Gbr.4 Mikrostruktur pelat aluminium murni komersial sesuai saat diterima (*as received*) dengan RD: arah pengerolan, NS: penampang normal, ND: arah normal, TS: Penampang melintang, LS: Penampang memanjang, TD: Arah melintang,  $d_L$ : ukuran butir di arah memanjang,  $d_T$ : ukuran butir di arah melintang,  $d_s$ : ukuran butir di arah ketebalan [Irawan, 2006].



Gbr.5 Mikrostruktur pelat aluminium murni yang dianil pada suhu 563 K selama 30 menit [Irawan, 2006].

Tabel 2 Ukuran butir dari mikrostruktur, dalam  $\mu\text{m}$  [Irawan, 2006]

Ukuran butir ( $\mu\text{m}$ )	Pelat saat diterima	Pelat telah dianil
$d_L$	2.6	2.3
$d_s$	1.3	1.0
$d_T$	2.6	2.4



Gbr.6 Intensitas difraksi sinar X dari bidang kristal pada permukaan retak lelah [Irawan, 2006]. [O] : retak merambat ke RD, [X] : retak tidak merambat ke RD.

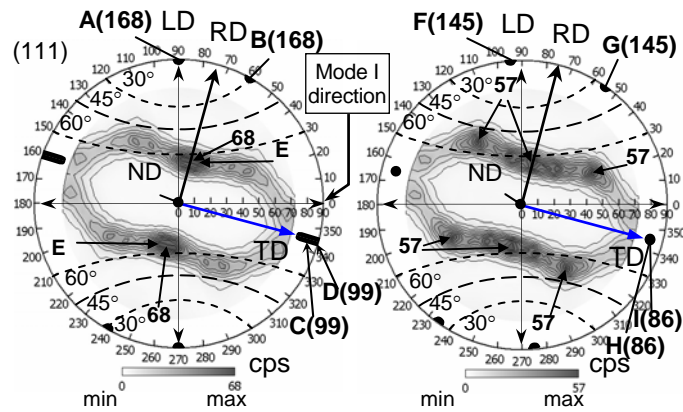
bahwa fenomena perambatan retak lelah ke arah pengerolan sebagai retak mode campuran I dan II berhubungan dengan adanya tekstur bidang geser aluminium (111) pada pelat.

Kondisi tekstur bidang geser (111) dalam pelat aluminium juga telah diukur dengan menggunakan difraksi sinar X dan gambar bidang kutub (111). Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran gambar kutub bidang geser (111) dan tekstur bidang (111) pada pelat aluminium murni komersial dan yang telah dianil pada suhu 563 K selama 30 menit dengan arah pengerolan (RD, *Rolling Direction*) 15°, 30°, dan 45° terhadap arah pembebanan (LD, *Loading Direction*). TD (*Transverse Direction*) merupakan arah yang tegak lurus terhadap arah pengerolan RD dan arah normal dari pelat ND (*Normal Direction*). Dalam Gbr.7, spesimen yang bertanda (O) adalah spesimen yang mana retak lelah merambat ke arah pengerolan sebagai retak mode campuran I+II. Sedangkan spesimen yang bertanda (X) adalah untuk spesimen yang mana retak lelah merambat ke arah mode I yang mana tegak lurus terhadap arah pembebanan. Angka pada garis bentuk (*contour*) dalam gambar kutub menunjukkan kekuatan difraksi sinar X dari bidang (111) yang dinyatakan dalam *cps*, *counts per second*. Semakin besar angka kekuatan difraksi sinar X atau *cps*-nya makin banyak bidang (111) yang berada di posisi tersebut. Kemudian, enam buah garis putus-putus yang tergambar dalam gambar kutub adalah posisi bidang kristal yang membentuk sudut 30°, 45°, dan 60° terhadap arah pembebanan LD. Dalam kondisi tegangan bidang (*plane stress*), posisi pada garis putus-putus 45° menunjukkan dimana pada bidang tersebut terjadi tegangan geser maksimum. Bila bidang geser dari aluminium bidang (111) berada pada atau di dekat posisi ini maka bidang ini akan sangat mudah mengalami pergeseran atau *slip*.

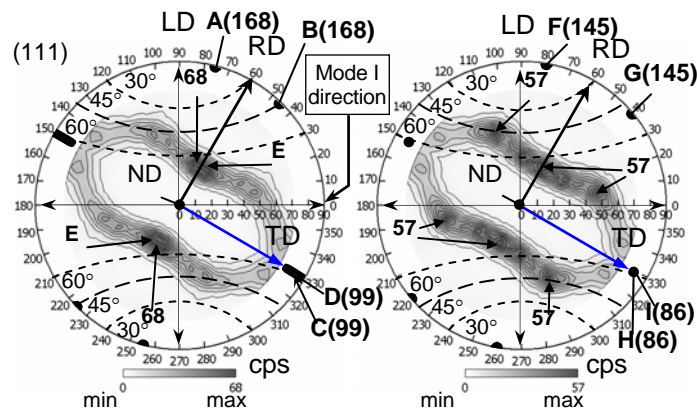
Pada gambar 7(a) yang menunjukkan gambar kutub bidang kristal (111) dari pelat aluminium murni komersial dengan arah pengerolan 15° terhadap arah pembebanan, puncak garis bentuk dari bidang (111) C dan D berada jauh dari posisi tegangan geser maksimum (garis putus-putus 45°) sehingga bidang geser (111) sulit bergeser ke arah pengerolan sehingga dipikirkan retak lelah sulit merambat ke arah pengerolan. Sedangkan pada pelat aluminium murni komersial dengan arah pengerolan 30° yang ditampilkan dalam Gbr.7(b), puncak garis bentuk B berada pada daerah tegangan geser maksimum. Akan tetapi, puncak garis bentuk C dan D dengan intensitas total yang lebih tinggi juga berada di dekat daerah tegangan geser maksimum dan didukung dengan rendahnya kekuatan geser pada arah pengerolan maka bidang geser (111) lebih banyak bergeser ke arah pengerolan yang menyebabkan retak lelah merambat ke arah pengerolan. Pada pelat aluminium dengan arah pengerolan 45° seperti pada Gbr. 7(c), puncak tekstur (111) C dan D berada pada daerah tegangan geser maksimum. Namun puncak tekstur A dan B juga berada pada daerah yang sama dengan kekuatan difraksi sinar X yang lebih tinggi sehingga bidang geser (111) pun juga mudah bergeser ke arah yang tegak lurus arah pengerolan. Kondisi ini membuat retak lelah tidak merambat ke arah pengerolan namun merambat ke arah mode I.

Untuk pelat aluminium yang telah dianil seperti ditunjukkan dalam Gbr.7d, 7e, dan 7f, intensitas atau kekuatan difraksi bidang geser (111) pada pelat ini lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan difraksi pada pelat aluminium komersial. Selain itu puncak dari tekstur tidak terpusat dan tercerai di berbagai tempat sehingga pada pelat aluminium dengan arah pengerolan apapun bidang geser (111) juga bergeser ke arah lain selain ke arah pengerolan. Disebabkan oleh kondisi ini, retak lelah menjadi tidak merambat ke arah pengerolan sebagai retak mode campuran I dan II namun merambat ke arah mode I. Dari hasil di atas dapat diketahui bahwa penyebab dari merambatnya retak lelah ke arah pengerolan sebagai retak lelah mode campuran I + II adalah bidang geser aluminium (111) yang banyak bergeser ke arah pengerolan.

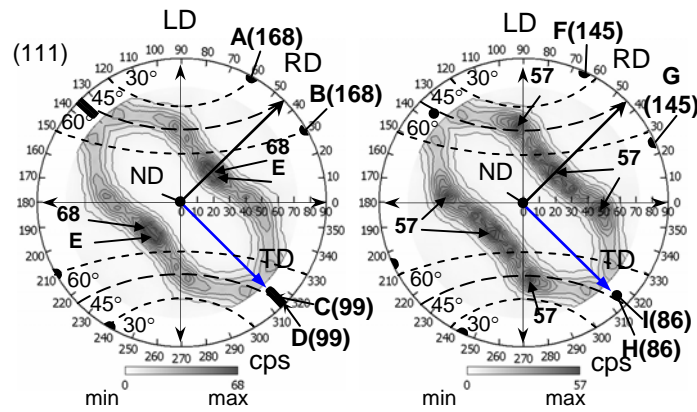
Pada umumnya retak lelah yang merambat pada tingkatan II (*stage II*), tidak dipengaruhi oleh mikrostruktur [Forsyth, 1963]. Akan tetapi berdasarkan hasil penelitian yang telah dijelaskan di atas, untuk pelat aluminium murni komersial yang karena telah dirol dingin, pelat tersebut memiliki tekstur bidang geser (111) yang kuat pada arah pengerolan. Dengan kondisi ini maka dapat dipikirkan bahwa retak lelah merambat ke arah pengerolan sebagai retak lelah mode campuran I+II dengan proses permulaan retak lelah (*fatigue crack initiation*) yang berkesinambungan yang mana banyak dipengaruhi oleh pergeseran dari bidang geser ke arah pengerolan.



(a) As Received, RD=15° [X] (d) Annealed 563 K, 30 min. [X]



(b) As Received, RD=30° [O] (e) Annealed 563 K, 30 min. [X]



(c) As Received RD=45° [X] (f) Annealed 563 K, 30 min. [X]

Gbr.7 Gambar kutub (111) dari pelat aluminium murni komersial sesuai saat diterima dan pelat aluminium yang telah dianil pada suhu 563 K selama 30 menit [Irawan, 2006] ( LD:Arah Pembebanan, RD: Arah Pengerolan, ND: Arah Normal, TD: Arah Melintang , [O]: retak merambat ke RD, [X]: retak tidak merambat ke RD).

## Kesimpulan

Dari pembahasan di atas penyebab dari jalur perambatan retak lelah unik pada pelat aluminium murni dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada permukaan patahan retak lelah dari retak yang merambat ke arah pengerolan sebagai retak campuran I dan II di pelat aluminium komersial murni terdapat lebih banyak bidang geser aluminium (111) dibandingkan dengan permukaan patahan retak di pelat komersial yang telah dianil.
2. Pada bidang pengerolan dari pelat aluminium komersial murni terdapat tekstur logam bidang geser (111) yang lebih kuat dibandingkan dengan pelat aluminium murni yang telah dianil.
3. Saat puncak garis bentuk dari tekstur bidang geser (111) di bidang pengerolan berada pada daerah tegangan geser maksimum, maka retak lelah lebih mudah merambat ke arah pengerolan sebagai retak mode campuran I dan II.
4. Bila puncak dari tekstur bidang geser (111) di bidang pengerolan tidak berada di daerah tegangan geser maksimum, maka retak lelah akan merambat sebagai retak mode I.

### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membantu sebagian pembiayaan dalam rangka presentasi makalah ini di Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin V 2006.

### Daftar Pustaka

- ASTM (2000) "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size", *ASTM E112-96* p.254
- Cullity, B.D. dan Stock, S.R. (2001) "Elements of X-ray Diffraction" Prentice-Hall, p.416
- Forsyth, P.J.E. (1963) "Fatigue Damage and Crack Growth in Aluminum Alloys", *Acta Metallurgica*, Vol.11, pp.703-715
- Hagiwara, Y. et.al. (1994) "Effect of Anisotropy and Plate Thickness on the Fatigue Crack Propagation of Aluminum Plate Specimens" *Proceedings of the 37th Japan Congress on Materials Research*, the Society of Materials Science, Japan, pp.46-51
- Hagiwara, Y. et.al. (1994) "Effect of Anisotropy and Mean Stress on the Fatigue Crack Propagation of Aluminum Plate Specimens", *Proceedings of the 1994 Annual Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers-Materials and Mechanics Division*, No.940-73, pp.193-194
- Hatch, J.E. (1984) "Aluminum: Properties and Physical Metallurgy", *ASM*, p.128
- Irawan, Y.S. (2006) "Behavior of Peculiar Fatigue Crack Growth Path in Anisotropic Pure Aluminum Sheets", *Doctoral Dissertation*, Musashi Institute of Technology, Tokyo.
- Irawan, Y.S, Hagiwara, Y. dan Ohya, S. (2006), "Behavior of Fatigue Crack Growth Paths in Peculiar Anisotropic Commercial Pure Aluminum Sheets (A1100P)", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A*, Vol.72, No.719, pp.1017-1024.
- Le May, I. dan Nair, K.D. (1970) "Directionality of Fatigue Properties in Some Textured Sheet Metals", *Journal of Basic Engineering*, Vol.92, pp.115-120
- Newby, J. (editor) (1990) "ASM Handbook: Metallography and Microstructures, vol.9, *ASM International*, pp.89-95.
- Nagashima, S.(1984) "Texture", *Maruzen*, p.12
- Nagashima, S.(1984) "Texture", *Maruzen*, pp.79-80
- Uchiyama, I et. al. (1972) "X-ray Microanalyzer", *NikkanKougyouShinbun*, Tokyo, p.27