

PENGARUH PERLAKUAN PANAS PASCA PENGELASAN TERHADAP LAJU PERAMBATAN RETAK LELAH BAJA SS 400

*Influence of Post Weld Heat Treatments on Fatigue Crack
Growth Rate of SS 400 Steel*

Sugiarto¹, R. Soekrisno²

Program Studi Teknik Mesin
Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

ABSTRACT

Low carbon steel welding problems are the non-homogenous structure, the high residual stress, and inclusion. These conditions will increase the fatigue crack growth rate effectively. Post weld heat treatments (PWHT) can be estimated to minimize these problems. In this research, the influence of post weld heat treatments on crack growth rate of SS 400 steel was investigated.

Carbon dioxide shielded GMAW process was used on butt joint of 9 mm thick SS 400 steel raw material. Four conditions of PWHT, i.e. P1, P2, P3, and P4 were treated on welding joint. For first condition, the specimen was held for 1 hour at 150 °C furnace temperature, then heated to 750 °C and held for 2 hours, then cooled in air to room temperature (P1). For 2nd condition (P2), the specimen was treated as in P1, except it was held for 1 hour at 450 °C furnace temperature. For third condition (P3), the specimen was cooled in air to room temperature, then heated to 750°C and held for 2 hours, followed by air cooling to room temperature. For fourth condition (P4), the specimen was treated as in P3, except it was cooled in the furnace at a rate of 50°C/hour to room temperature. The crack growth rate tests were carried out on 6,5 mm thick of compact tension specimen (CTS). The results were compared with the welded specimen without treatment (C1) and the base material (BM).

¹ Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang

² Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

The result shows that PWHT decreases crack growth rate on weld metal and HAZ effectively. The highest crack growth rate of transversal butt joint on weld metal was welding specimen without treatment (C1), having Paris constant number (n) = 4.21, and the lowest was P4, with n = 3.01. PWHT decreased the weld metal crack growth rate 20.19-28.503 % compare to C1 and decreased 2.687-10.149 % compare to BM. The crack growth rate of HAZ by PWHT increased 4.437-17.065 % compare to C1. The lowest of HAZ crack growth rate of longitudinal butt joint was P4 with n = 4.066 and the lowest of weld metal crack growth rate of longitudinal butt joint was P2 with n = 2.61

Key words: *fatigue crack growth rate, post weld heat treatment, Paris constant number*

PENGANTAR

Struktur yang tidak homogen dan lonjakan tegangan yang tinggi di sekitar las merupakan permasalahan yang sering muncul pada sambungan las. Sulit mendapatkan hasil las yang baik dengan memperbaiki las secara lokal saja. Perbaikan itu mungkin malah akan menurunkan ketangguhan lelehnya (Slater, 1985).

Baja SS 400 termasuk baja karbon rendah ($C < 0,25$ %) dan paduan rendah (paduan $< 2,5$ %). Menurut Dolby (1983), baja dengan kandungan C dan paduan rendah akan mudah mengalami inklusi pada batas austenit selama pengelas. Inklusi ini sangat rentan terhadap laju perambatan retak leleh. Butiran halus yang disebut *acicular ferrite* dapat menurunkan laju perambatan retak leleh. Tsay dkk. (1997) menguatkan pernyataan di atas bahwa inklusi pada batas austenit sangat sensitif terhadap timbulnya *hydrogen-induced cracking* (HIC). Perlakuan panas pasca pengelas diperkirakan dapat memecahkan permasalahan di atas. Namun, perlakuan panas mana yang dipilih, memerlukan pengkajian lebih mendalam.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas pasca pengelas (*post weld heat treatment* (PWHT)) terhadap laju perambatan retak leleh plat baja SS 400 pada daerah las dan daerah HAZ. Hasilnya dibandingkan dengan karakteristik logam dasar (BM) dan hasil las yang tidak diberi perlakuan panas (C1).

Pemuaiian termal dan penyusutan selama proses pengelas menimbulkan tegangan sisa di sekitar logam las yang besarnya dapat mencapai tegangan luluh logam dasar. Tegangan sisa ini berupa tarik pada daerah sejajar sumbu las yang dapat menurunkan umur lelah (Berkovits dkk. 1998)

Rading (1993) telah meneliti pengaruh pengelas terhadap laju perambatan retak fatik pada baja struktur, dan ternyata laju perambatan retak terbesar terdapat pada daerah HAZ dan terkecil pada daerah logam las. Laju perambatan retak pada daerah HAZ disebabkan oleh pembentukan nitrida, penggetasan hidrogen, dan pengasaran butiran.

Pemanasan lokal terhadap hasil las baja tahan karat AISI 304 tidak mempengaruhi besar butir struktur austenit, tetapi dapat mempercepat laju perambatan retak fatik. Proses anil yang diberikan setelah pemanasan lokal dapat memperbesar butiran austenit, meningkatkan keuletan bahan, dan memperlambat perambatan retak fatik (Jamasri, 1997).

Nawrocki dkk. (2001) meneliti pengaruh PWHT terhadap HAZ baja *ferritic* dengan pemanasan pada suhu 575 °C, 625 °C, 675 °C, dan 725 °C dengan kecepatan 200 °C/jam, lalu ditahan 0,5, 1, 5 dan 10 jam kemudian didinginkan di udara hingga suhu ruang. Dari penelitian itu ditemukan bahwa kekerasan menurun dengan kenaikan temperatur dan kekerasan paling tinggi dicapai pada pemanasan 525 °C dan penahanan 5 jam. Hal itu timbul karena terjadi pengerasan sekunder dengan adanya presipitasi karbida M_3C yang kaya Fe pada batas austenit untuk baja 2,25 Cr-1 Mo dan presipitasi karbida yang kaya W pada batas butir untuk baja HCM2S.

Menurut Tsay (1997) kekerasan baja D6AC menurun dengan meningkatnya teperatur tempering dari 400 °C - 600 °C; demikian juga dengan kekuatan tarik dan kekuatan luluhnya. Tetapi, keuletan dan kekuatan impaknya meningkat dengan kenaikan temperatur. Perambatan retak (FCGR) menurun dengan peningkatan suhu temper dan laju perambatan retak daerah las dan HAZ lebih rendah daripada logam dasar untuk ΔKs yang sama.

Linear Elastic Fracture Mechanic (LEFM) merupakan prinsip dasar dalam studi karakteristik laju perambatan retak lelah sebagai fungsi faktor intensitas tegangan. Konsep LEFM biasanya diberikan dalam bentuk kurva sigmoidal (da/dN) terhadap ΔK .

$-\Delta K = K_{maks} - K_{min}$, untuk $R > 0$ dan $\Delta K = K_{maks}$, untuk $R \leq 0$(1)

atau : $\Delta K = (S_{maks} - S_{min}) \beta \sqrt{\pi} \cdot a$ (2)

$R = S_{min} / S_{maks} = K_{min} / K_{maks}$ (3)

dengan : ΔK = amplitudo faktor intensitas tegangan

K_{min} dan K_{maks} = faktor intensitas tegangan terkecil dan terbesar

R = Perbandingan tegangan

S_{min} dan S_{maks} = Tegangan terkecil dan tegangan terbesar

β = faktor geometri yang besarnya tergantung pada dimensi benda

a = panjang retak.

Pada daerah linear berlaku hukum Paris (*Paris law*) dalam bentuk persamaan :

$da/dN = C (\Delta K)^m$ (4)

dengan C dan m adalah tetapan yang nilainya tergantung pada sifat bahan. Nilai C akan turun jika modulus elastisitas, kekuatan luluh, tegangan patah, regangan patah, dan faktor intensitas tegangan kritis bahan, naik. C adalah koefisien yang dapat dicari dengan menarik garis lurus sampai nilai $\Delta K = 1 \text{ Mpa} \sqrt{\text{meter}}$ ($\text{Ksi} \sqrt{\text{in}}$). Nilai m merupakan tangen arah kurva dan besarnya dipengaruhi oleh orientasi arah butir, ketangguhan, kekuatan luluh, dan dimensi benda uji. Batas ambang laju perambatan retak lelah (ΔK_{th}) ditentukan berdasarkan laju perambatan retak lelah $10^{-7} \text{ mm/siklus}$ menurut setandar ASTM-E647.

CARA PENELITIAN

Material yang diuji adalah plat baja SS 400 yang dilas tumpul (*butt joint*) yang berupa bahan untuk *frame bogie* kereta api tipe TB 389 dengan ketebalan 9 mm. Komposisi paduan yang diteliti menurut Riyanta (2001) ditampilkan dalam tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia plat baja SS400

Unsur	Fe	C	Si	Mn	Al	Co	Cu	S
kadar	98,84	0,205	0,018	0,782	0,011	0,01	0,004	0,013
Unsur	Mo	Ni	W	Ti	Nb	Cr	P	V
kadar	0,004	0,335	0,0415	0,004	0,0065	0,021	0,015	0,001

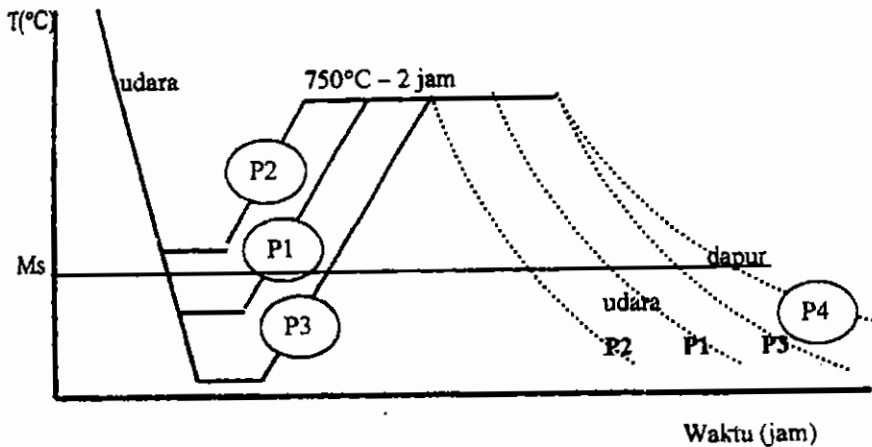
Elektrode las yang digunakan adalah tipe ER-70S-6 standar AWS.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain : mesin uji tarik sekaligus uji perambatan retak, yaitu *hydraulic servopulser*, mesin uji kekerasan *Vickers Microhardness Tester*, mikroskop metalurgi, peralatan ukur suhu, dapur pemanas tipe *mufler furnace*, alat untuk mengamati perambatan retak (*optical travelling microscope*), dan mesin las jenis GMAW semi otomatis.

Jalan Pengujian

Perlakuan I (P1)

Baja yang telah dilas didinginkan di udara sampai suhu di bawah M_s ($\pm 150^\circ\text{C}$), ditahan dalam dapur pemanas pada suhu itu selama 1 jam, kemudian suhu dapur dinaikkan dengan laju $300^\circ\text{C}/\text{jam}$ sampai suhu 750°C , ditahan selama 2 jam, dan dilanjutkan dengan pendinginan udara sampai suhu ruang.



Gambar 1. Perlakuan panas yang diberikan

Perlakuan II (P2)

Baja yang telah dilas didinginkan di udara sampai suhu di atas M_s ($\pm 450^\circ\text{C}$), dan dilanjutkan sebagaimana tahapan P1.

Perlakuan III (P3)

Baja yang telah dilas didinginkan di udara sampai suhu ruang. Selanjutnya dipanaskan dalam dapur dengan kecepatan $300^\circ\text{C}/\text{jam}$ sampai suhu 750°C , ditahan selama 2 jam dan dilanjutkan dengan pendinginan udara sampai suhu ruang.

Perlakuan IV (P4)

Baja yang telah dilas diperlakukan sebagaimana tahapan P3 tetapi pendinginan akhir adalah pendinginan dapur dengan kecepatan 50°C/jam sampai suhu ruang.

Tanpa perlakuan

Untuk logam dasar yang tidak dilas diberi inisial BM, sedangkan spesimen las tanpa perlakuan panas diberi inisial C1.

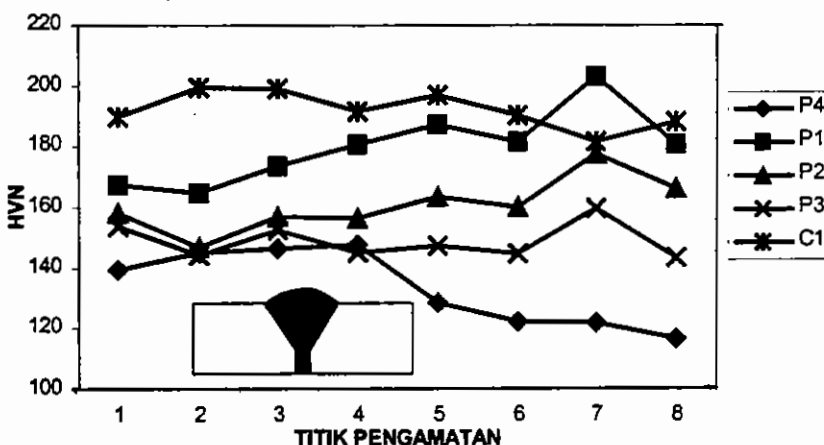
Las GMAW

Proses pengelasan dilakukan di PT. INKA Madiun dengan las GMAW semi otomatis, tegangan 24 volt, arus 250 ampere, kecepatan las 4 mm/s, gas pelindung berupa CO₂, diameter elektrode 1,2 mm dan jumlah lapis adalah 2. Spesimen uji tarik dilaksanakan berdasarkan standar AWS-B4.O-77 (1977) dan spesimen uji retak adalah CTS berdasarkan standar ASTM-E647 (1988).

Uji perambatan retak dilakukan dengan mesin *servopulser* pada *Stress Ratio* (R)= 0,1; frekuensi 6 - 14 Hz, *Stress level* 20 %. Retak diamati pada kedua sisinya dengan *optical travelling microscope* dengan pembesaran 20x. Sebagai data pendukung dilakukan uji kekerasan, tarik, dan mikrostruktur.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

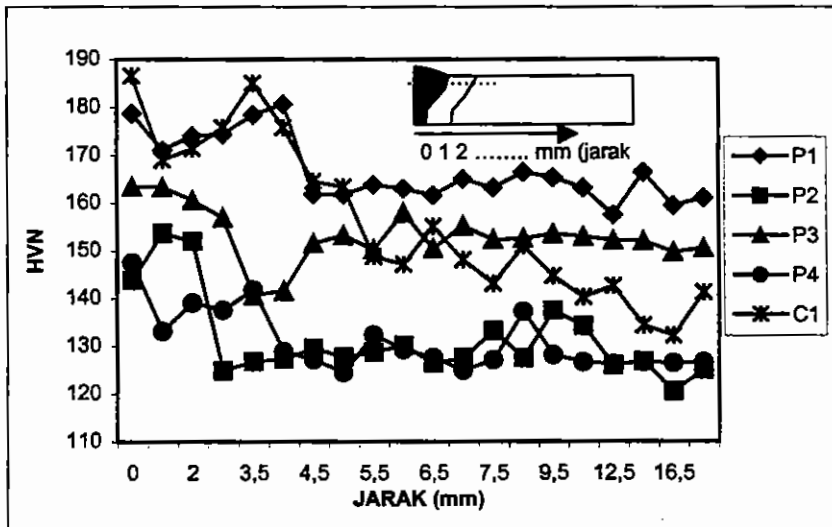
Hasil pengujian kekerasan



Gambar 2. Distribusi kekerasan arah vertikal pada pusat las

Dari data kekerasan arah vertikal diketahui adanya fluktuasi data akibat proses pengelasan dua lapis, sehingga logam las pada lapis pertama mengalami pemanasan ulang pada proses pemanasan lapis kedua. Dengan demikian, daerah antara dua lapis mengalami rekristalisasi yang mengakibatkan butirannya menjadi halus. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.

Dari Gambar 3 terlihat bahwa distribusi kekerasan arah horisontal mengalami perubahan mulai daerah las menurun hingga daerah HAZ yang berbutir kasar, kemudian naik lagi hingga daerah rekristalisasi yang berbutir halus, dan selanjutnya linear pada daerah yang tidak terpengaruh panas. Dari data itu secara umum proses perlakuan panas yang diberikan, menurunkan kekerasan terutama pada daerah las dan HAZ. Distribusi kekerasan C1 terlihat lebih curam dibandingkan dengan spesimen yang diberi perlakuan panas, karena struktur pada daerah HAZ lebih homogen.

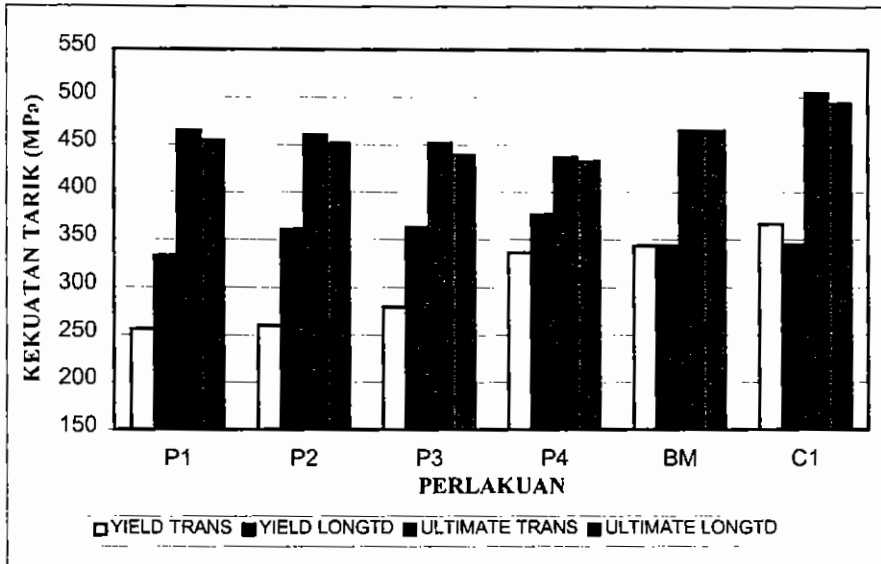


Gambar 3. Distribusi kekerasan arah horisontal

Hasil pengujian tarik

Dari pengujian tarik diketahui bahwa terjadi penurunan tegangan tarik akibat perlakuan panas, baik pada arah transversal maupun longitudinal. Dari gambar 4 tampak bahwa tegangan tarik tertinggi dimiliki oleh C1 dan yang paling rendah P4. Penurunan tegangan tarik ini merupakan efek pelunakan akibat proses perlakuan

panas. Hanya P2 arah transversal saja yang tegangan luluhnya lebih tinggi dari logam dasar (BM), sedangkan yang lain masih di bawah BM dan C1.

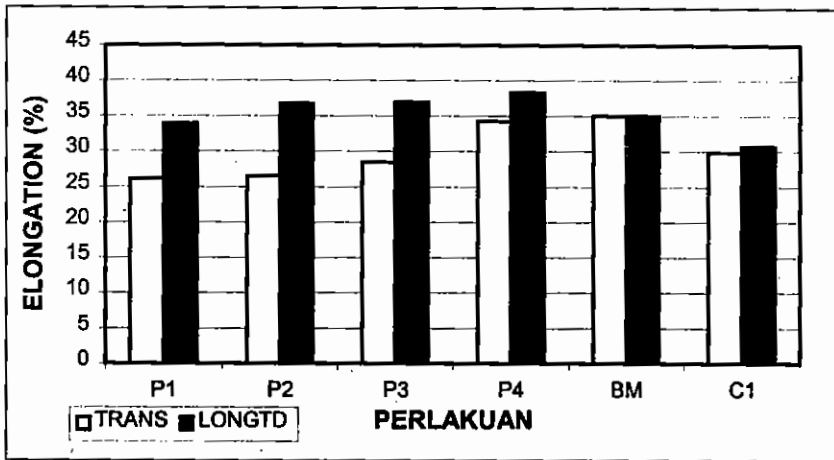


Gambar 4. Tegangan tarik dan tegangan luluh

Logam dasar mempunyai tegangan tarik 464,798 MPa dan tegangan luluh 343,546 MPa. Untuk arah transversal, pemberian perlakuan panas pasca pengelas menurunkan tegangan tarik 0,04 - 5,95 % terhadap BM dan 7,84 - 13,29 % terhadap C1, sedangkan tegangan luluhnya turun 1,31 % - 13,18 % terhadap BM dan hanya P2 yang naik. Terhadap C1 tegangan luluh turun 12,39 % - 25,31 %.

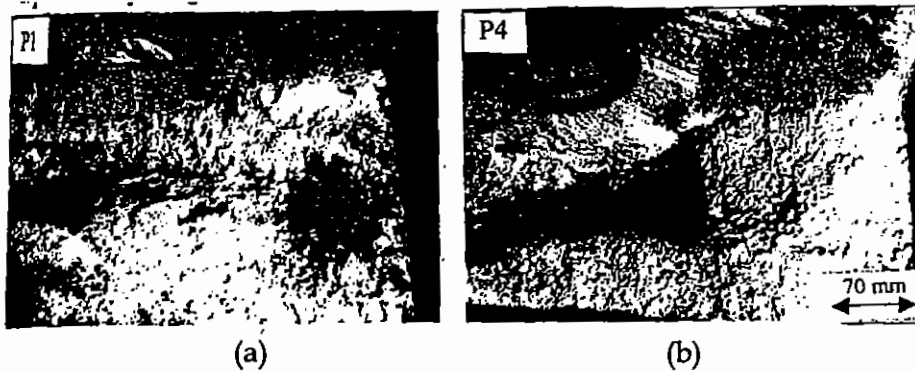
Untuk sambungan longitudinal, perlakuan panas menyebabkan kekuatan tariknya turun 2,26 % - 7 % terhadap BM dan 8 - 12,45 % terhadap C1. Untuk tegangan luluh turun 0,16 % - 5,27 % terhadap BM dan 8,8 % - 13,54 % terhadap C1.

Dari gambar 5 diketahui bahwa untuk arah transversal, proses perlakuan panas menurunkan elongasi 2,14 - 25,53 % terhadap BM, terhadap C1 turun 4,62 - 12,66 % untuk P1-P3, sedangkan untuk P4 naik 12,87 %. Untuk arah longitudinal proses perlakuan panas (P2 - P4) elongasinya naik 4,71 - 8,66 % terhadap BM, tetapi untuk P1 turun 3,11 %, dan terhadap C1 semuanya naik 9,58 - 19,98%.



Gambar 5. Persen perpanjangan (elongasi)

Secara umum keuletan spesimen dengan perlakuan panas cukup baik. Penampang patahan spesimen, baik pada arah transversal maupun longitudinal, menunjukkan bentuk patahan ulet yang ditandai dengan terjadinya *necking* pada daerah patahan dan bentuk permukaan patahan yang kasar (Gambar 6)

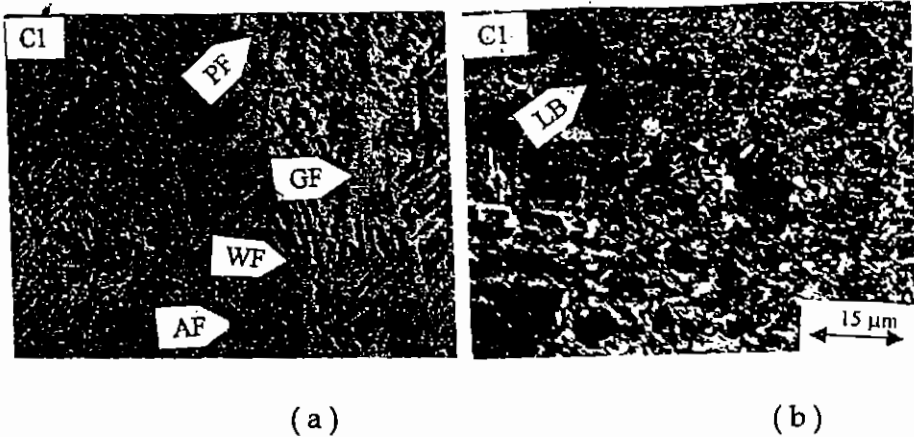


Gambar 6. Penampang patahan tarik arah transversal

Hasil analisis struktur mikro

Struktur logam dasar terdiri atas ferit dan pearlit yang berbentuk pipih sebagai hasil pengerolan dingin saat pembuatan plat. Dari gambar 7(a) terlihat bahwa struktur mikro daerah las C1 didominasi oleh struktur ferit batas butir (GF) dan ferit widmanstatten (FW) yang tumbuh dari GF, ferit poligonal (PF), dan ferit asikular (AF)

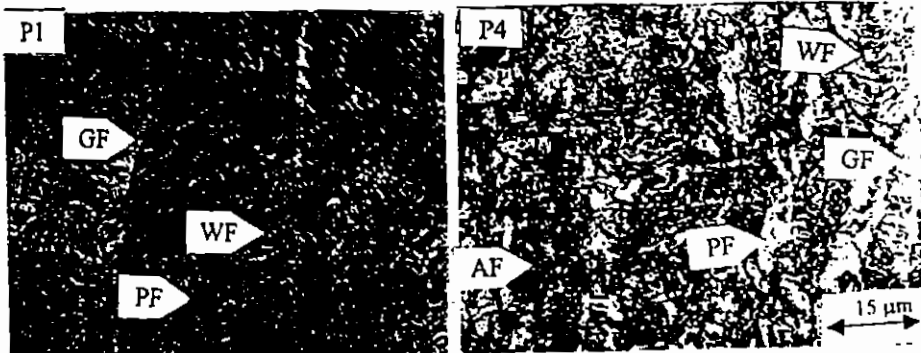
yang berbutir kecil dan membentuk anyaman. Di daerah ini juga terdapat struktur bainit (B).



Gambar 7. Struktur mikro (a) daerah las C1 (b) daerah HAZ C1

Keterangan gambar struktur mikro :

F = Ferit P = Perlit AF = Ferit asikular
 LB = Bainit bawah GF = Ferit batas butir
 PF = Ferit poligonal WF = Ferit widmanstatten

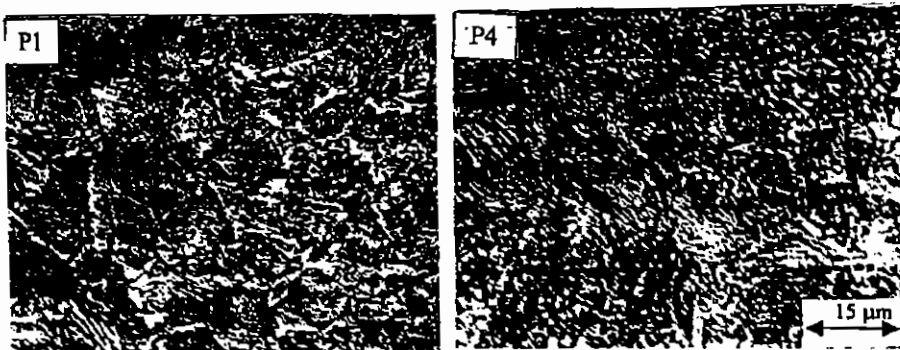


Gambar 8. Struktur mikro daerah las

Adanya AF dan Bainit memungkinkan sifat daerah ini lebih keras dari logam dasar. Gambar (b) menunjukkan struktur butiran yang besar dan kasar akibat suhu yang diterima berada pada daerah pertumbuhan butir. Daerah HAZ yang berbutir kasar ini merupakan daerah yang paling rentan terhadap kepatahan atau kerusakan. Tegangan sisa pada daerah ini mencapai nilai tertinggi di daerah

HAZ, sehingga menyebabkan konsentrasi tegangan yang besar pada daerah ini jika diberi pembebanan dari luar.

Struktur mikro logam las akibat perlakuan panas untuk P1 dan P4 dapat dilihat pada gambar 8. Daerah las keempat spesimen yang mengalami perlakuan panas pasca pengelasan didominasi oleh struktur ferit batas butir (GF), poligonal ferit (PF), dan ferit widmanstatten (WF). Selain itu, masih ada ferit asikular (AF) pada P4.



Gambar 9. Struktur mikro HAZ

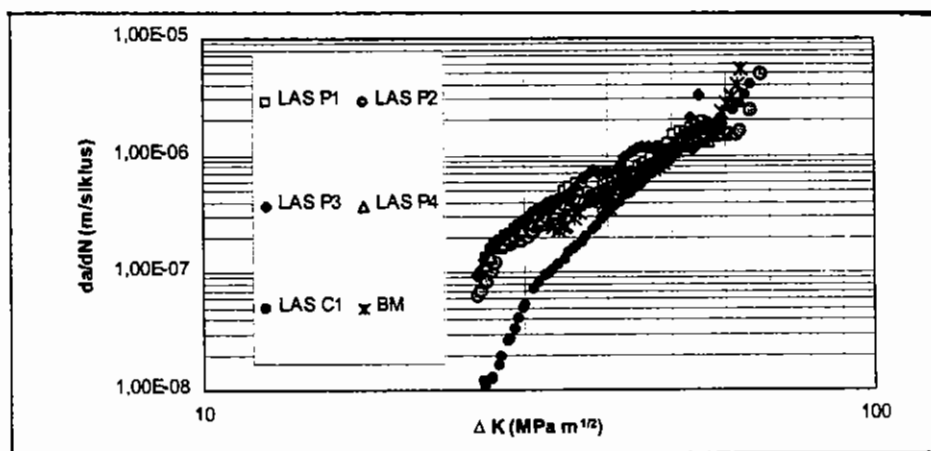
Dari gambar 9 diketahui bahwa dengan perlakuan panas, struktur HAZ mengalami homogenisasi struktur, dan yang paling baik dimiliki oleh P4. Berdasarkan hasil uji tarik diketahui bahwa semua patahan spesimen arah transversal ada pada daerah HAZ. Dari keempat perlakuan panas yang paling ulet adalah P4, yang berarti tingkat homogenitas struktur HAZ pada P4 ikut memberikan pengaruh positif terhadap keuletannya.

Hasil uji perambatan retak lelah

Hasil pengujian arah transversal untuk daerah logam las disajikan dalam bentuk grafik da/dN terhadap ΔK seperti terlihat pada Gambar 10, dan konstante persamaan Paris untuk daerah las ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Konstanta persamaan Paris logam las arah transversal

No	Spesimen	Konstante Persamaan Paris	
		A	N
1	Base Metal (BM)	$2,0 \times 10^{-12}$	3,35
2	Logam Las C1	$0,35 \times 10^{-12}$	4,21
3	Logam Las P1	$7,0 \times 10^{-12}$	3,11
4	Logam Las P2	$3,0 \times 10^{-12}$	3,26
5	Logam Las P3	$3,0 \times 10^{-12}$	3,36
6	Logam Las P4	$8,0 \times 10^{-12}$	3,01

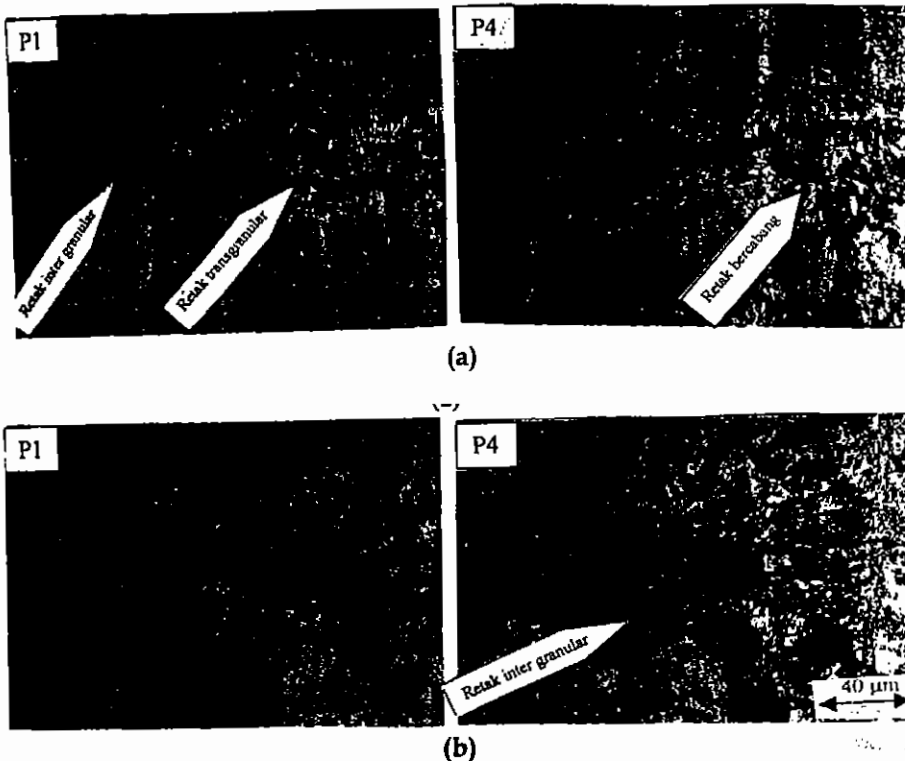


Gambar 10. Grafik laju perambatan retak daerah las

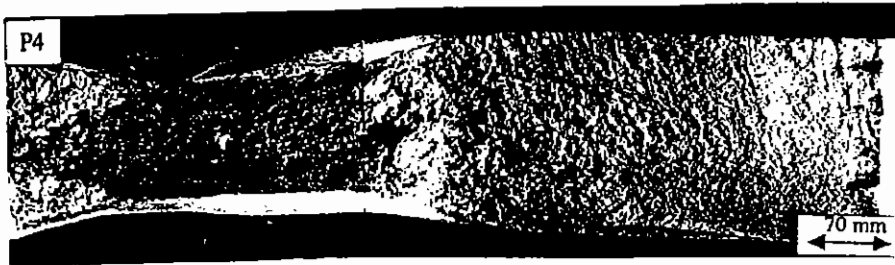
Dari tabel 2 dan gambar 10 dapat diketahui bahwa laju perambatan retak lelah paling tinggi terjadi pada C1 dengan $n = 4,21$ dan yang paling rendah pada P4 dengan $n = 3,01$. Dengan perlakuan panas pasca pengelasan, laju perambatan retak lelah daerah las untuk P1, P2, dan P4 turun 2,687 - 10,149 % terhadap logam dasar (BM) sedangkan P3 naik 0,3 % terhadap BM. Dengan perlakuan panas, laju perambatan retak daerah las juga turun 20,19- 28,503% terhadap C1. Rendahnya laju perambatan retak lelah pada P4 disebabkan oleh efek pendinginan lambat dalam dapur sehingga material menjadi lebih lunak dan keuletannya meningkat. Dari foto mikrostruktur daerah las diketahui bahwa pada P4 terbentuk ferit asikular (AF) meskipun tidak terlalu dominan. Ferit asikuler ini juga diindikasikan memberi pengaruh positif terhadap laju perambatan retak lelah pada P4.

Dari Gambar 11 tampak bahwa bentuk patahan akibat beban fatik berbentuk patahan campuran yang didominasi oleh retak

intergranular atau retak batas butir. Bentuk patahan ini mengindikasikan bentuk patahan yang ulet. Khusus untuk bentuk patahan pada P4 banyak terdapat percabangan retak yang umumnya dapat menghambat laju perambatan retak. Foto makro hasil uji laju perambatan retak (CGR) pada logam las untuk semua spesimen perlakuan panas, menunjukkan karakteristik bentuk patahan yang sama, yaitu patahan ulet. Sebagai contoh, pada gambar 12 ditampilkan bentuk penampang patahan logam las P4 yang ulet karena permukaan patahnya kasar dan tidak mengkilap. Kecuali itu, juga terjadi penyusutan ketebalan sepanjang retakan yang menunjukkan terjadinya perubahan plastis selama perambatan retak, yang dikuatkan oleh gambar 13 yang menunjukkan bentuk plastisitas pada ujung retak eksperimen P4 yang dialami oleh semua spesimen uji. Hal ini menunjukkan bahwa pengujian retak terjadi pada kondisi tegangan bidang (*plane stress*) dan terjadi deformasi plastis menuju ke arah ketebalan spesimen.



Gambar 11. Karakteristik bentuk patahan (a). daerah las (b). daerah HAZ



Gambar 12. Bentuk patahan hasil uji CGR pada logam las P4



Gambar 13. Bentuk plastisitas pada ujung retak pada P4

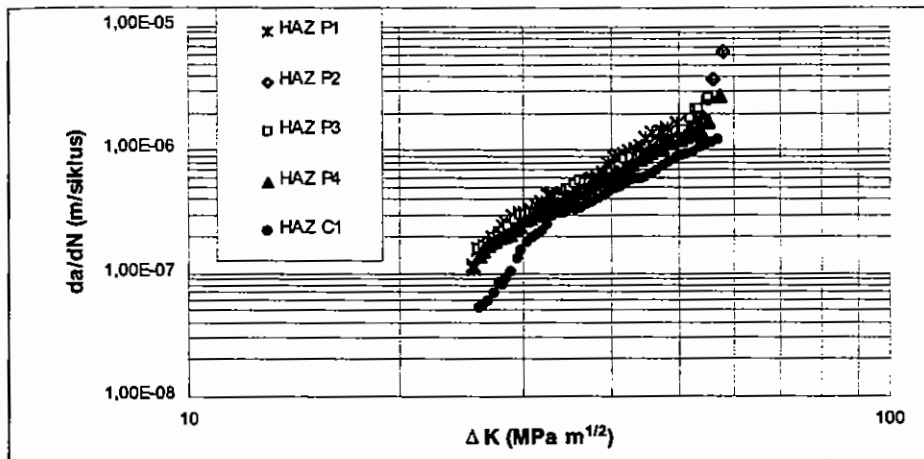
Tabel 3. Konstantan persamaan Paris HAZ sambungan transversal

No	Spesimen	Konstanta Persamaan Paris	
		A	n
1	HAZ C1	$13,0 \times 10^{-12}$	2,93
2	HAZ P1	$2,0 \times 10^{-12}$	3,43
3	HAZ P2	$6,0 \times 10^{-12}$	3,15
4	HAZ P3	$6,0 \times 10^{-12}$	3,14
5	HAZ P4	$8,0 \times 10^{-12}$	3,06

Tabel 3 dan gambar 14 menunjukkan bahwa laju perambatan retak lelah daerah HAZ akibat perlakuan panas yang paling rendah, adalah P4 dengan $n = 3,06$. Hal ini sesuai dengan gambar struktur mikro pada daerah HAZ dan data elongasi tarik. Spesimen P4 memiliki struktur HAZ yang paling homogen dibandingkan dengan spesimen yang lain. Tetapi, secara umum proses perlakuan panas, menaikkan laju perambatan retak lelah pada daerah HAZ sebesar

4,437 - 17,065 % terhadap C1, karena dominasi struktur ferit pada P1-P4 dan hilangnya struktur bainit pada daerah HAZ akibat perlakuan panas. Khusus untuk P4 penurunan tidak terlalu signifikan.

Bentuk patahan pada ujung retak untuk daerah HAZ juga menunjukkan patahan campuran yang didominasi oleh retak *intergranular*, dan sebagai contoh dapat dilihat gambar 12 untuk spesimen P4. Bentuk patahan makro hasil uji laju perambatan retak (CGR) pada daerah HAZ untuk semua spesimen dengan perlakuan panas, juga menunjukkan karakteristik bentuk patahan ulet. Penyusutan ketebalan terjadi sepanjang retakan sebagai bentuk perubahan plastis selama perambatan retak yang terjadi pada daerah las.

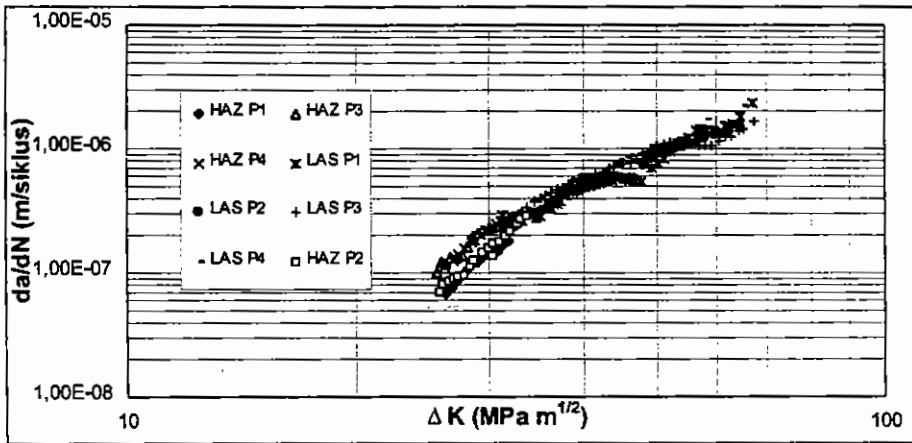


Gambar 14. Grafik laju perambatan retak daerah HAZ

Untuk pengujian arah longitudinal, penyajian grafik dan konstante persamaan Paris dibedakan dalam dua daerah, yaitu daerah HAZ dan daerah logam las. Hal ini akibat perbedaan laju perambatan retak yang cukup signifikan pada kedua daerah itu, sehingga jika ditampilkan dalam satu plot regresi tidak dapat mewakili keadaan yang sebenarnya. Hasil uji ditampilkan dalam tabel 4 dan gambar 15. Pada daerah HAZ laju perambatan retak lelah paling rendah, dijumpai pada P4 dengan nilai $n = 4,066$ sedangkan pada daerah las P2 mempunyai nilai $n = 2,610$. Namun, perbedaan laju perambatan retak lelah pada daerah las tidak terlalu besar.

Tabel 4. Konstanta persamaan Paris sambungan longitudinal

No		GAGAL			
1	Longitudinal C1				
2	Longitudinal P1	$0,2 \times 10^{-7}$	$0,5 \times 10^{-4}$	5,359	2,674
3	Longitudinal P2	$0,2 \times 10^{-7}$	$0,6 \times 10^{-4}$	5,325	2,610
4	Longitudinal P3	$2,0 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-4}$	4,278	2,701
5	Longitudinal P4	$1,0 \times 10^{-7}$	$0,7 \times 10^{-4}$	4,066	2,736



Gambar 15. Grafik laju perambatan retak arah longitudinal

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Laju perambatan retak lelah arah transversal di daerah las paling tinggi terjadi pada spesimen las tanpa perlakuan panas dengan $n = 4,89$ dan paling rendah pada spesimen las dengan pendinginan dapur dengan nilai $n=3,01$. Dengan perlakuan panas laju perambatan retak lelah daerah las turun 2,687 - 10,149 % terhadap logam dasar dan 20,19 - 28,503 % terhadap spesimen las tanpa perlakuan panas.

2. Laju perambatan retak lelah arah transversal di daerah HAZ akibat perlakuan panas, meningkat 4,437 - 17,065 % dibandingkan dengan spesimen las yang tanpa perlakuan panas. Kenaikan paling rendah dijumpai pada spesimen las yang diberi perlakuan panas dengan pendinginan dapur, yaitu naik 4,437 %.

3. Pada arah longitudinal laju perambatan retak lelah paling rendah untuk daerah HAZ terdapat pada spesimen yang diberi

perlakuan panas dengan pendinginan dapur, dengan nilai $n = 4,066$, sedangkan pada daerah las adalah spesimen yang diberi perlakuan panas dengan penahanan pada suhu $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan nilai $n = 2,610$.

4. Dari hasil foto makro dan mikro daerah retakan, diketahui patahan akibat pembebanan fatik terhadap spesimen uji adalah patahan campuran yang didominasi oleh retak intergranular atau retak batas butir. Bentuk patahan ini mengindikasikan bentuk patahan yang ulet.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM-E647, 1988, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth rates*, 1-12.
- AWS B4. O-77, 1977, *Standard Methods for Mechanical Testing of Welds*.
- Berkovits, A., Kelly, D.W. and Di, S., 1998, *Consideration of the Effect of Residual Stresses on Fatigue of Welded Aluminium Alloy Structures*, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 21, 159-170.
- Broek, D., 1987, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publisher, Netherlands.
- Dolby, R.E., 1983, *Advances in Welding Metallurgy of Welding*, *Int. Journal Metal Technology*, 10, 349-361
- Easterling, K., 1983, *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworths & Co (publishers) Ltd., Sweden.
- Jamasri, 1997, *Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Laju Perambatan Retak Fatik Baja Tahan Karat AISI 304*, *Media Teknik*, 19(3), 32-36.
- Nawrocki, J.G., Dupont, J.N., Robino, C.V., Marder, A.R., 2001, *The Postweld Heat Treatment Response of Simulated Coarse-Grained Heat Affected Zones in a New Ferritic Steel*, *Int. Journal Metallurgical and Materials Transactions*, 32A, 2585-2594.
- Rading, G.O., 1993, *The Effect of Welding on Fatigue Crack Growth Rate in a Structural Steel*, *Welding Journal*, July, 307-311
- Riyanta, B., 2001, *Pengaruh Stress Relieving Pasca Pengelas Terhadap Perilaku Retak Lelah Bahan Bogie Kereta Api Pada Daerah Sambungan Las*, Makalah Seminar Tesis, UGM, Yogyakarta.

Slater, G. 1985, *The Effect of Repair Welds on Service Performance*, *Welding Journal*, 64 (3), 22-29.

Tsay, L.W., Chung, C.S., Chen, C., 1997, *Fatigue Crack Propagation of D6AC Laser Welds*, *Int. Journal fatigue*, 19(1), 25-31.