

**Analisis Kerusakan *Inlet Duct* Untuk Turbin
Pembangkit Listrik Akibat Retak Las Melintang
(*transverse Weld Crack*)
Failure Analysis Report**

Oleh : Pradoto Ambardi

Jurusan Teknik Metalurgi FT. UNJANI

Ringkasan. Pelat casing inlet duct banyak sekali mengalami retak transversal yang memotong logam las sampai ke base-metal. Panjang retakan bervariasi hingga beberapa puluh sentimeter. Kondisi ini tentunya sangat membahayakan bagi konstruksi tersebut.

Hasil pemeriksaan komposisi kimia dan perhitungan nilai karbon ekuivalen ($CE = 0,4$) menunjukkan bahwa material pelat inlet duct memiliki mampu las yang baik, sedangkan nilai parameter retak (P_c) adalah 0,383 menunjukkan kerentanan terhadap retakan jika pengelasan dilakukan dalam lingkungan yang banyak mengandung uap air.

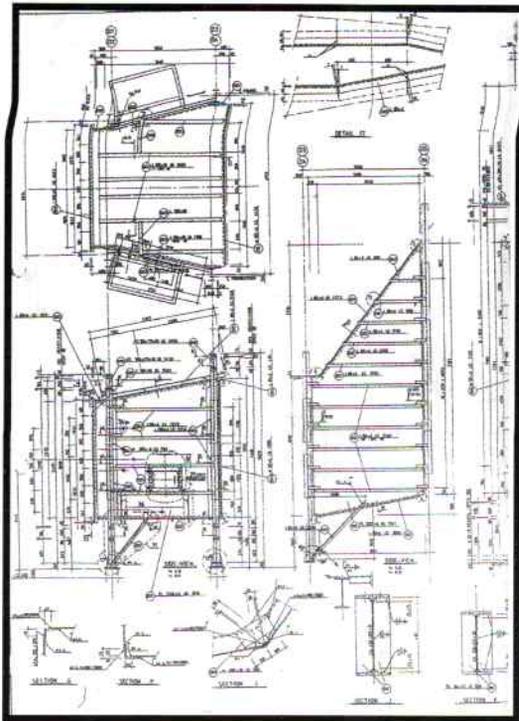
Adanya produk korosi yang didominasi oleh FeO pada dinding bagian dalam pelat inlet duct menunjukkan temperatur pada daerah tersebut sangat tinggi (lebih besar dari 500°C). Tingginya temperatur pada dinding tersebut menyebabkan hidrogen akan lebih cepat berdifusi sehingga dapat memicu terjadinya retakan. Selain itu, kekerasan logam las (222 – 229 VHN) yang lebih tinggi dari base-metal (143,5 VHN), porositas yang terbentuk akibat pengelasan, dan inklusi non-metalik menyebabkan retak transversal akan lebih mudah menjalar.

Kata Kunci : Inlet duct, transverse weld crack, karbon ekuivalen, parameter retak.

L. Pendahuluan

Inlet duct merupakan konstruksi bangunan berupa lorong yang digunakan untuk mengarahkan gas panas hasil pembuangan dari turbin uap ke boiler. Bagian dalam dari *inlet duct* terbuat dari material insulasi panas yang dilapisi *glasswool* dan ditutup dengan pelat baja setebal 6 mm yang berfungsi sebagai casing. Hal ini dimaksudkan agar temperatur fluida tidak mengalami penurunan yang drastis.

Temperatur fluida (uap panas) yang memasuki *inlet duct* sekitar 550°C . Akibat adanya material insulasi panas (*Lapinus wire maths type 160*), temperatur pada dinding luar pelat *inlet duct* menjadi tidak terlalu tinggi yaitu sekitar 55°C . Gambar teknik konstruksi *inlet* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Potongan gambar teknik Inlet duct

Pelat-pelat *casing inlet duct* disambung dengan menggunakan sistem pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Pada daerah sambungan las banyak sekali dijumpai retakan yang memiliki arah melintang terhadap sumbu logam las (*transverse weld-metal cracking*). Hasil pemeriksaan di lapangan memperlihatkan bahwa temperatur di sekitar retakan meningkat hingga mencapai 80°C .

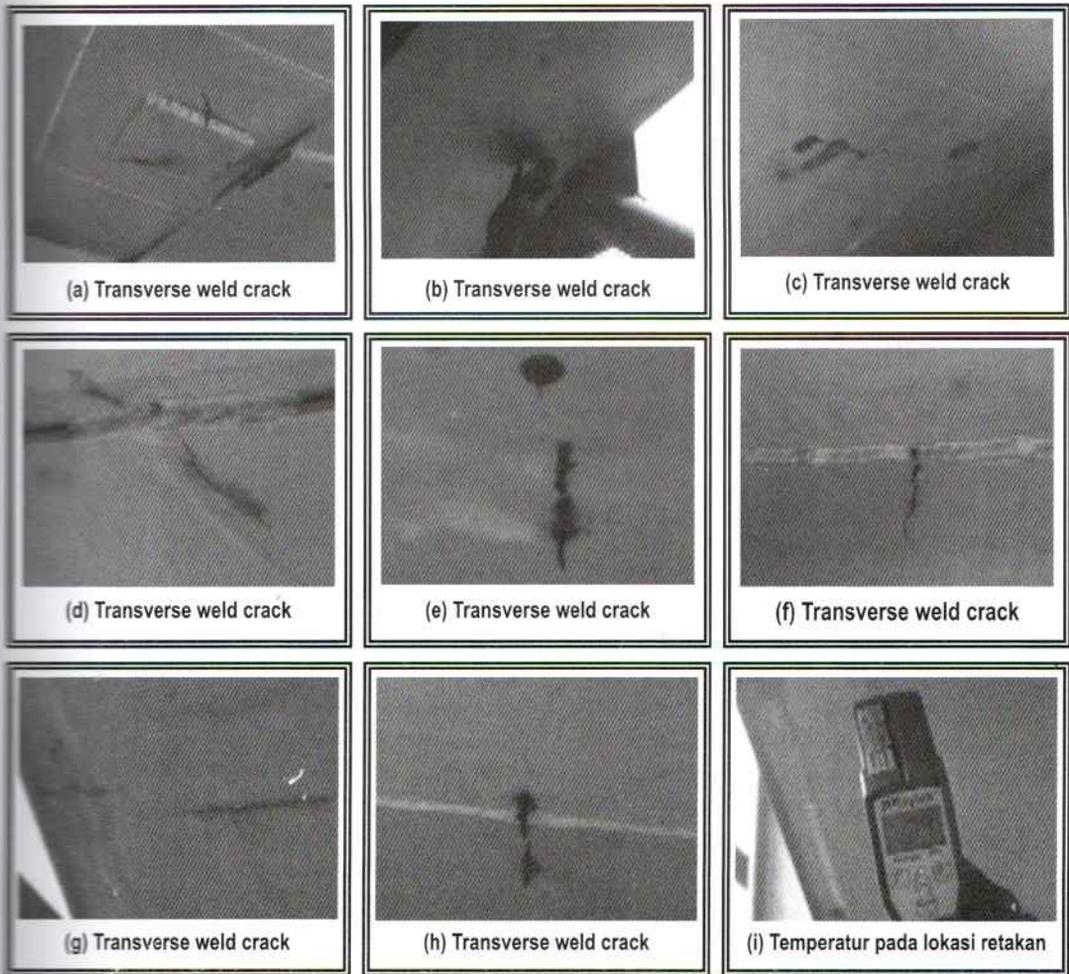
Walaupun pelat *inlet duct* secara praktis tidak menanggung beban apapun kecuali beban beratnya sendiri dan beban alami berupa hembusan angin, tetapi banyaknya retakan pada *inlet duct* yang memotong logam las sampai *base-metal* dengan panjang puluhan sentimeter akan sangat membahayakan keamanan konstruksi tersebut. Untuk menghindari terjadinya hal-hal yang tidak diinginkan maka perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui penyebab terjadinya retakan, sehingga diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan bagi pemecahan masalah yang dihadapi.

II. Investigasi Lapangan

Data Lapangan

Hasil pemeriksaan visual di lapangan menunjukkan bahwa *inlet duct* banyak mengalami retak yang disertai korosi di daerah lasan. Secara umum, retakan yang terjadi memotong (melintang) logam las (*transverse weld-metal cracking*).

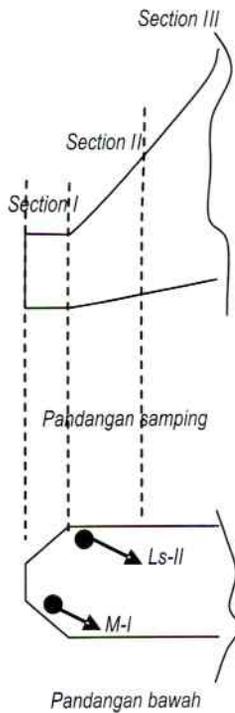
Dinding sisi luar pelat *inlet duct* (*front-face inlet duct*) memiliki temperatur 50°C , tetapi di daerah retakan yang menyebabkan kebocoran (adanya hembusan udara panas yang keluar dari dalam dinding ke atmosfer) temperatur bisa mencapai 80°C . Posisi sebagian retakan yang terjadi di *inlet duct* dapat dilihat pada Gambar 2.



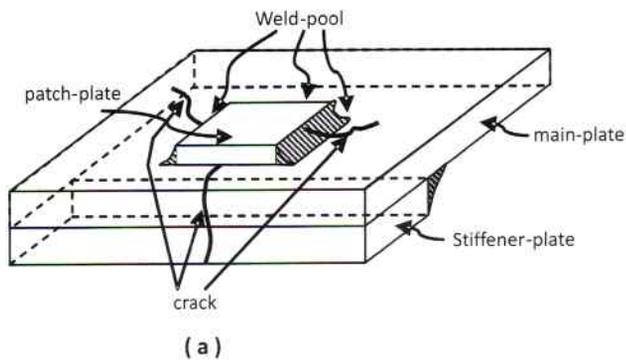
Gambar 2. Retak melintang hasil las dan temperatur di daerah retakan pada inlet duct

Lokasi Pengambilan Sampel

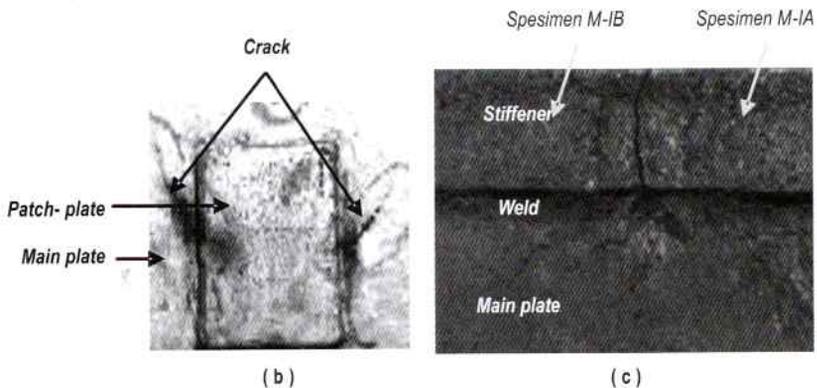
Sampel pertama (M-I) diambil dari pelat bagian tengah *section I inlet duct* (Gambar 2.a), sedangkan sampel kedua (Ls-II) diambil dari pelat sisi kiri *section II* (Gambar 2.b.). Posisi pengambilan spesimen uji dari sampel dicantumkan pada Gambar 3 sampai 5.



Gambar 3. Lokasi pengambilan sampel



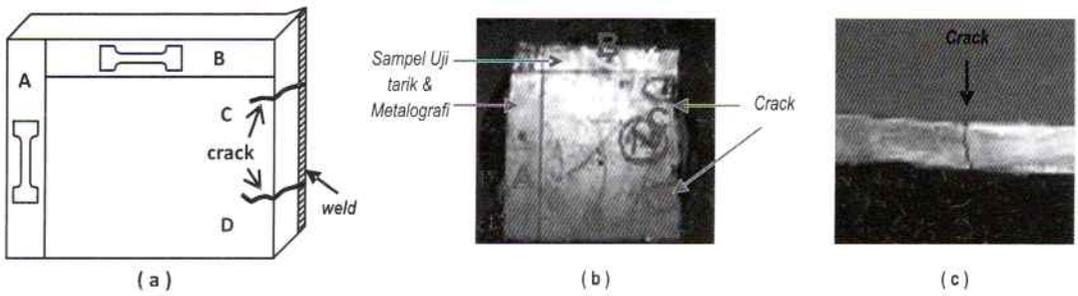
(a)



(b)

(c)

Gambar 4. (a) Kondisi sampel M-I ; (b) Retakan pada mainplate-sampel M-I (c) Permukaan dinding belakang (back-face)sampel M-I.



Gambar 5. (a) Posisi pengambilan spesimen uji tarik pada sampel Ls-II ;
 (b) Kondisi sampel Ls-II ; (c) Retakan pada daerah C

Perhitungan Kondisi Inlet Duct

Hasil wawancara di lapangan memberikan informasi bahwa temperatur permukaan luar pelat *inlet duct* adalah sekitar 55°C. Untuk mengetahui kebenaran informasi tersebut maka dilakukan perhitungan *heat transfer* yang terjadi pada *inlet duct*.

Name of equipment : Inlet Duct

Insulation material : Lapinus Wire Mats Type 160 , Density 70 kg/m³

Simbol yang digunakan dalam perhitungan

Temperatur udara luar ; t_a	Temperatur absolute lingkungan ; T_2
Temperatur operasi fluida ; t_f	Temperatur absolute operasi fluida ; T_f^*
Temperatur permukaan ; t_s	Kecepatan angin ; w
Temperatur rata-rata ; t_m	Konduktivitas termal ; k
Ketebalan insulasi ; x	Koefisien heat transfer permukaan ; α_a
Koefisien radiasi ; C	Kehilangan panas per meter persegi ; Q
Temperatur absolute permukaan ; T_1	

Data :

$t_a = 30^\circ\text{C}$; $t_f = 553^\circ\text{C}$; $T_1 = 55 + 273 = 328 \text{ K}$; $T_2 = 30 + 273 = 303 \text{ K}$; $C = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}^4$;
 $w = 3,2 \text{ m/det}$; Jika $x = 245 \text{ mm} = 0,245 \text{ m}$; $t_s = 55^\circ\text{C}$

$$t_m = \frac{t_f + t_s}{2} = \frac{553 + 55}{2} = 304^\circ\text{C}$$

Dari lembar data *Lapinus wire mats type 160*, pada $t_m = 304^\circ\text{C}$, harga $k = 0,095 \text{ W/mK}$:

$$T_f^* = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} = \frac{\left(\frac{328}{100}\right)^4 - \left(\frac{303}{100}\right)^4}{328 - 303} = 1,26\text{K}^3$$

Untuk $w \leq 5 \text{ m/det}$:

$$\alpha_a = 6,2 + 4,2 w + C T_f^* = 6,2 + (4,2 \times 3,2) + 0,5 \times 1,26 = 20,27 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Untuk $w > 5 \text{ m/det}$:

$$\alpha_a = 7,6 w^{0,8} + C T_f^* = 7,6 \times 3,2^{0,8} + 0,5 \times 1,26 = 19,9 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Q = \frac{t_f - t_a}{\frac{x}{k} + \frac{1}{\alpha_a}} = \frac{553 - 30}{\frac{0,245}{0,095} + \frac{1}{20,27}} = 199 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$t_s' = \frac{Q}{\alpha_a} + t_a = \frac{199}{20,27} + 30 = 39,82 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kondisi :

Nilai mutlak $|t_s' - t_s| < 0,5 \Rightarrow |t_s' - t_s| = |39,82 - 55| = 15,18$

Karena $15,18 > 0,5$ maka diambil $t_s = t_s' = 39,82^\circ\text{C}$

Perhitungan ulang**Data :**

$t_a = 30^\circ\text{C}$; $t_f = 553^\circ\text{C}$; $T_1 = 39,82 + 273 = 312,82 \text{ K}$; $T_2 = 30 + 273 = 303 \text{ K}$;
 $C = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}^4$; $w = 3,2 \text{ m/det}$; Jika $x = 245 \text{ mm} = 0,245 \text{ m}$

Input :

$t_s = 39,82^\circ\text{C}$

$$t_m = \frac{t_f + t_s}{2} = \frac{553 + 39,82}{2} = 296,41^\circ\text{C}$$

Dari lembar data *Lapinus wire mats type 160*, pada $t_m = 296,41^\circ\text{C}$, harga $k = 0,092 \text{ W/mK}$:

$$T_f^* = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} = \frac{\left(\frac{312,82}{100}\right)^4 - \left(\frac{303}{100}\right)^4}{312,82 - 303} = 1,17\text{K}^3$$

Untuk $w \leq 5 \text{ m/det}$:

$\alpha_a = 6,2 + 4,2 w + C T_f^* = 6,2 + (4,2 \times 3,2) + 0,5 \times 1,17 = 20,22 \text{ W/m}^2\text{K}$

Untuk $w > 5 \text{ m/det}$:

$\alpha_a = 7,6 w^{0,8} + C T_f^* = 7,6 \times 3,2^{0,8} + 0,5 \times 1,17 = 19,9 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$Q = \frac{t_f - t_a}{\frac{x}{k} + \frac{1}{\alpha_a}} = \frac{553 - 30}{\frac{0,245}{0,092} + \frac{1}{20,22}} = 193,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$t_s' = \frac{Q}{\alpha_a} + t_a = \frac{193,7}{20,22} + 30 = 39,58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kondisi :

Nilai mutlak $|t_s' - t_s| < 0,5 \Rightarrow |t_s' - t_s| = |39,58 - 39,82| = 0,238$

Karena $0,238 < 0,5$ maka OK

Jadi ketebalan insulasi yang digunakan, $x = 245 \text{ mm}$

$T_{s(\text{shade})} = 39,58^\circ\text{C}$

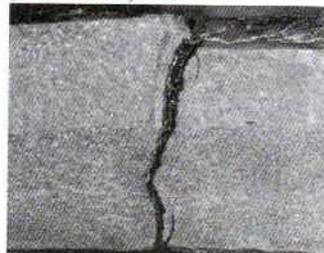
$T_{s(\text{sun})} = 39,58 + 13 = 52,59^\circ\text{C}$

III. Pengujian Laboratorium Pemeriksaan Visual Dan Makro

Retakan yang terjadi pada *back-face* sampel M-I (Gambar 4.c) menyebabkan pelat terbelah dua. Pada permukaan patahan terlihat adanya cacat lasan berupa kantung gas (*gas pocket*) di *interface* logam las – *base metal* dan porositas di daerah lasan (Gambar 6).



Gambar 6. Permukaan patahan sampel M-I (*stiffener*) memperlihatkan adanya cacat kantung gas (*gas pocket*)



Gambar 7. Struktur makro spesimen Ls-IIC. Retak transversal yang menyebabkan pelat *inlet duct* terbelah.

Struktur makro spesimen Ls-IIC memperlihatkan adanya retak transversal yang membelah pelat *inlet duct* dan logam las (Gambar 7). Detail distribusi struktur mikro pada specimen tersebut juga memberikan informasi adanya perbedaan struktur mikro logam las, daerah *heat affected zone* (HAZ), dan *base-metal* serta porositas di daerah logam las dan HAZ.

Pemeriksaan Komposisi Kimia

Pemeriksaan ini meliputi pemeriksaan komposisi kimia pelat *inlet duct* dan logam las (Tabel 1). Dari pemeriksaan tersebut dapat disimpulkan bahwa material yang digunakan untuk *inlet duct* sesuai dengan ASTM A36.

Tabel 1. Analisa komposisi kimia (%)

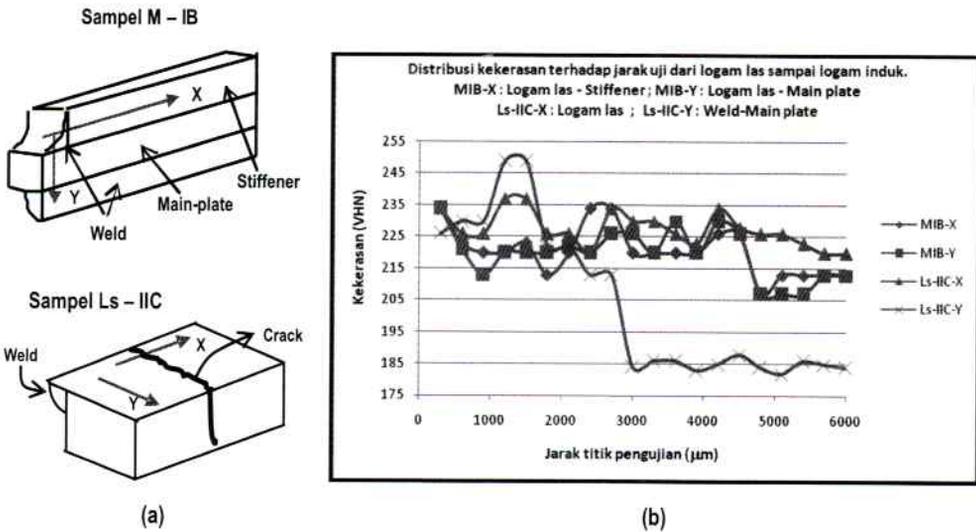
Unsur	Sampel Base Metal	ASTM A-36 Plate	Sampel Weld Metal
C	0.26	0,25 – 0,29	0.33
Si	0.25	0,15 – 0,40	0.34
Mn	0.59	0,85 – 1,2	0.73
P	0.008	0,04 (max)	0.032
S	0.018	0,05 (max)	0.056
Cr	0.04	-	0.02
Ni	0.10	-	0.06
Cu	0.19	0,20	0.06

Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan meliputi pengujian kekerasan *main-plate inlet duct* dengan menggunakan metoda *Brinell* (Table 2) dan distribusi kekerasan daerah lasan (Gambar 2.10) dengan menggunakan metode *micro Vickers*.

Tabel 2. Kekerasan material *inlet duct* (HB)

Spesimen	Pengujian kekerasan ,HB				Rata-rata
	1	2	3	4	
Ls-IIA	137	137	138	139	137,75 (143,5 VHN)
Ls-IIB	132	137	132	138	134,75 (141,8 VHN)



Gambar 8. Kekerasan mikro. (a) Posisi pengujian. (b) Distribusi Kekerasan dari logam las sampai ke HAZ pada spesimen M-IB dan Ls-IIC

Pemeriksaan Metalografi

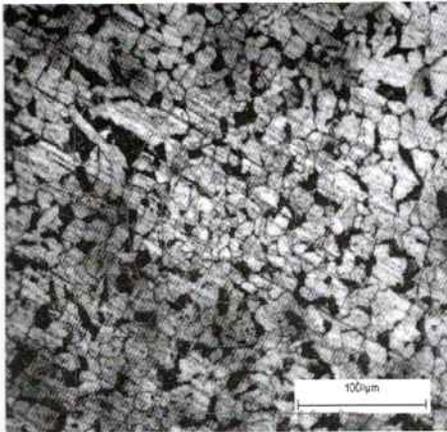
Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi akibat proses pengelasan, arah pengerolan dan butir pelat *inlet duct*.

A. Struktur mikro sample Ls-II

Struktur mikro *base-metal* spesimen Ls-IIA dan Ls-IIB relatif sama (Gambar 9. dan 10.) dengan bentuk butir yang relatif *equiaxial* sehingga sukar untuk memastikan arah pengerolan pada saat pembuatan pelat. Adanya butir yang *equiaxial* tersebut juga dapat mengindikasikan bahwa temperatur di sisi belakang pelat *inlet duct* cukup tinggi, walaupun masih di bawah temperatur rekristalisasi.

Captured0	
Total length, µm	2000.000
Grain size number	7.759
Number of intercepts	92.000
Mean intercept length, µm	21.739
Statistics	
Min grain size	7.759
Max grain size	8.929
Mean grain size	8.344
Std.dev. grain size	0.585
Total length, µm	4000.000
Number of intercepts	230.000
Mean intercept length, µm	18.116
Number of fields	2.000
95% Confidence interval	7.481
Relative accuracy, %	41.295

Captured0	
Total length, µm	2000.000
Grain size number	7.759
Number of intercepts	92.000
Mean intercept length, µm	21.739
Statistics	
Min grain size	7.759
Max grain size	9.189
Mean grain size	8.440
Std.dev. grain size	0.432
Total length, µm	8000.000
Number of intercepts	477.000
Mean intercept length, µm	17.578
Number of fields	4.000
95% Confidence interval	2.666
Relative accuracy, %	15.170



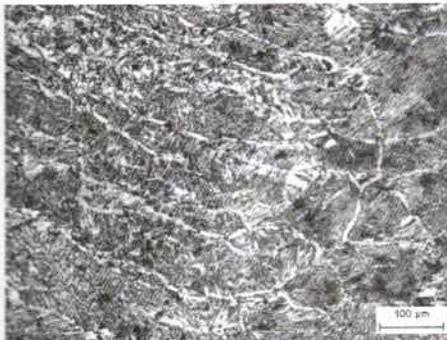
Gambar 9. Struktur mikro Ls-IIA



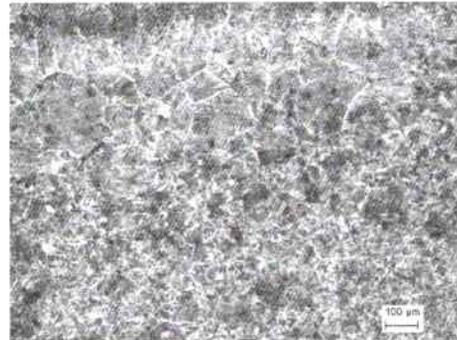
Gambar 10. Struktur mikro Ls-IIB

B. Struktur mikro sample M-I

Struktur mikro sample M-I didapat dari spesimen M-IB yang diperiksa dari dua sisi yaitu : dari logam las sampai ke *stiffener* dan dari logam las sampai ke *main plate inlet duct*. Pada kedua lokasi tersebut dijumpai porositas di daerah logam las dan HAZ (Gambar 11 dan 12).



Gambar 11. Porositas yang terdapat di daerah logam las-HAZ pada *stiffener* dari spesimen M-1B



Gambar 12. Porositas yang terdapat di daerah logam las-HAZ pada *main plate* dari spesimen M-1B

Pemeriksaan Produk Korosi

Produk korosi yang didapat dari *back-face* pelat *inlet duct* diperiksa menggunakan *Energy Dispersive Spectro Analysis (EDS)*.

Tabel 3. Produk korosi pada pelat inlet duct

Element	(keV)	mass%	Error%	At%	Compound	mass%	Cation	K
O		24.49						
Mg K	1.253	1.85	0.63	5.26	MgO	3.06	1.19	0.8708
Si K	1.739	2.31	0.51	5.69	SiO ₂	4.93	1.29	1.9074
Ca K	3.690	1.39	0.43	2.41	CaO	1.95	0.54	2.2188
Cr K	5.411	0.28	0.67	0.19	Cr ₂ O ₃	0.41	0.08	0.4484
Fe K	6.398	69.69	0.87	86.46	FeO	89.65	19.56	94.5566
Total		100.00		100.00		100.00	22.67	

Perhitungan Weldability Dan Parameter Retak

A. Weldability

Weldability material inlet duct dihitung dengan menggunakan formula *Carbon Equivalent*,

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} (\%)$$

Nilai CE = 0,4 merupakan batas atas yang menyatakan kemampuan las suatu material baik tanpa memerlukan *preheating*. Dari hasil perhitungan, karbon ekivalen (CE) untuk material inlet duct adalah sebesar **0,402** sehingga dapat dikatakan bahwa material inlet duct mempunyai sifat mampu las yang baik.

B. Parameter retak

Parameter yang berpengaruh pada peristiwa retakan di daerah hasil lasan adalah parameter retak (Pc). Hasil perhitungan nilai Parameter Retak pada produk lasan inlet duct dengan menggunakan persamaan :

$$Pc = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

adalah sebesar **0,383** sehingga apabila pada saat pengelasan banyak mengandung uap air maka kecenderungan retak akan sangat tinggi.

IV. Analisis Kerusakan

Hasil pengujian komposisi kimia (Tabel 1) memperlihatkan bahwa pelat yang digunakan pada inlet duct sesuai dengan yang disarankan dalam gambar teknik (Gambar 1). Nilai karbon ekivalen (CE) material tersebut (0,402%) mengindikasikan bahwa sifat mampu las material inlet duct cukup baik, tetapi nilai parameter retak (Pc) logam las (0,383%) menunjukkan bahwa produk las memiliki kecenderungan retak yang cukup tinggi jika pada saat pengelasan terdapat uap air.

Retak transversal (*transverse weld-metal crack*) biasanya timbul karena kekuatan logam las lebih tinggi dari pada *base-metal*. Hal ini didukung oleh hasil pengujian kekerasan *base-metal* (143,5 HVN) yang lebih kecil dari kekerasan logam las (222 – 229 VHN) seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2 dan Gambar 8. Keberadaan gas hidrogen yang “terjebak” di daerah las (dapat berasal dari uap air, oli, elektroda las yang tidak kering, dan lain-lain) akan menyebabkan retak tersebut semakin mudah menjalar karena setelah logam las membeku dan berjalannya waktu, hidrogen akan berdifusi untuk berkumpul di suatu tempat pada logam las atau daerah HAZ.

Pemanasan yang terjadi pada inlet duct akan menyebabkan tekanan gas hidrogen meningkat (akibat keterbatasan ruang di daerah lasan). Peningkatan tekanan hidrogen yang sangat tinggi pada akhirnya dapat memutuskan ikatan atom logam. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya retak di daerah HAZ yang kemudian menjalar secara transversal memotong logam las.

Retakan biasanya belum dapat terlihat setelah proses pengelasan selesai, tetapi setelah 48 sampai 72 jam barulah dapat diketahui retakan tersebut muncul di sekitar daerah las (*delay crack*). Penjalaran retakan (*crack propagation*) yang terjadi akan dipermudah dengan adanya porositas, inklusi non-metalik seperti mangan sulfide (MnS) di dalam base-metal, inklusi slag akibat pengelasan, dan lain-lain.

Keberadaan gas yang terjebak di daerah logam las dapat dibuktikan dengan adanya cacat las berupa kantung gas (Gambar 6) dan porositas (Gambar 11 dan 12). Hal ini mengindikasikan bahwa proses pengelasan *inlet duct* dilakukan pada lingkungan uap air yang cukup banyak.

Hal lain yang menarik adalah adanya produk korosi yang didominasi oleh FeO (Tabel 3) pada bagian dalam pelat *inlet duct*. Kenyataan ini menunjukkan bahwa temperatur pelat bagian dalam *inlet duct* yang mengalami retakan cukup tinggi karena sesuai dengan diagram Ellingham, FeO hanya terbentuk jika temperatur di atas 500°C.

Peningkatan temperatur khususnya di daerah retakan diduga kuat berasal dari adanya kebocoran pada pipa penyalur gas panas dan material insulasi panas, terutama di sekitar bagian yang terdapat tiang penguat dan *stiffener* (karena pelapisan insulasi panas yang sempurna pada daerah tersebut relatif sulit). Hal ini menyebabkan uap panas dapat menembus celah antara tiang penguat dengan material insulasi *glasswool* menuju ke dinding dalam pelat *inlet duct*. Hal ini dapat dibuktikan dengan adanya hembusan udara panas di sekitar retakan.

Pemanasan setempat yang terjadi pada proses pengelasan menyebabkan laju pendinginan tiap titik di daerah lasan akan berbeda-beda sehingga struktur mikro pada daerah HAZ akan bervariasi. Tiap-tiap zona struktur mikro pada daerah HAZ memiliki sifat mekanik yang berbeda. Siklus termal yang terjadi pada proses pengelasan tersebut menimbulkan tegangan sisa di daerah lasan. Semua kondisi tersebut menyebabkan daerah HAZ akan lebih anodik dibandingkan dengan *base-metal* yang tidak terpengaruh panas. Hal ini mengakibatkan HAZ akan lebih mudah terkorosi, yang pada akhirnya menyebabkan daerah tersebut menjadi lemah sehingga retakan akan lebih mudah terjadi di daerah tersebut.

V. Kesimpulan

1. Nilai karbon ekuivalen (CE) material *inlet duct* adalah 0,402% dan nilai parameter retak (Pc) logam las adalah 0,383%.
2. Retak transversal terjadi karena gas (khususnya hidrogen) yang terjebak pada daerah lasan cukup banyak dan kekerasan base-metal (143,5 VHN) lebih rendah dari pada logam las (222 – 229 VHN).
3. Produk korosi terbesar pada bagian dalam pelat *inlet duct* adalah FeO (89,65 %) yang menunjukkan bahwa temperatur pada dinding tersebut sangat tinggi.
4. Adanya hembusan udara panas di sekitar retakan memberikan indikasi adanya kebocoran dari sistem insulasi panas.

Daftar Pustaka

1. Annual Book of ASTM Standards., "*Steel Plate, Sheet, Strip, and Wire, Metallic Coated Products Fences, Part 3*", American Society for Testing and Materials., Philadelphia., PA. 1981,1982.
2. Kenneth Easterling., "*Introduction to Physical Metallurgy of Welding*", Butterworths
3. Robert D. Stout, Ph.D. & W. D'orville Doty, Ph.D. "*Weldability of Steels*", Welding Research Council., 1971
4. Hery Sonawan & Rochim Suratman., "*Pengantar Untuk Memahami Proses Pengelasan Logam*", Alfabeta., 2003.
5. Harsono Wiryosumarto, Prof. Dr. Ir. & Toshie Okumura. Prof. Dr., "*Teknologi Pengelasan Logam*", Edisi ke-3., Pradnya Paramita., Jakarta., 1985