

ANALISIS KERUSAKAN REL KERETA API ANGKUTAN BATUBARA

FAILURE ANALYSIS OF A RAILWAY RAIL FOR COAL TRAIN

Apriardi Ihlas

Balai Besar Bahan dan Barang Teknik, Jl. Sangkuriang No. 14 Bandung
apriardi.ihlas@gmail.com

Diterima : 26 Januari 2017

Direvisi : 28 Februari 2017

Disetujui : 15 Maret 2017

ABSTRAK

Penggunaan teknologi pengelasan termit pada sambungan rel kereta api menjadi pilihan utama karena mobilitas dan biayanya. Kerusakan telah terjadi pada sambungan rel kereta api yang digunakan sebagai angkutan batu bara dalam jumlah yang banyak. Pada penelitian ini akan dilakukan serangkaian pemeriksaan dan pengujian untuk mencari penyebab utama patahnya sambungan rel tersebut. Berdasarkan pemeriksaan fraktografi secara makro memperlihatkan pola patahan *chevron* dan *ratchet mark* sebagai petunjuk daerah awal retakan, yaitu *centerline* daerah las. Hasil pemeriksaan metalografi pada daerah inisiasi retakan menunjukkan terbentuknya jaringan fasa ferit yang lemah dengan ukuran butir perlit yang besar. Selain itu ditemukan sejumlah porositas mikro yang mendukung hasil pemeriksaan fraktografi. Hasil pemeriksaan fraktografi secara mikro dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) memperlihatkan tipikal patahan getas dan ditemukan banyak porositas mikro. Dari pemeriksaan komposisi kimia dengan *Energy Dispersive Spectrometer* (EDS) ditemukan slag inklusi tipe alumina. Dengan demikian, rendahnya kualitas sambungan las termit diakibatkan oleh terbentuknya retakan awal dari dalam berupa porositas mikro pada *centerline* daerah las.

Kata Kunci: rel kereta api, las termit, porositas penyusutan interdendritik, jaringan ferit, slag inklusi alumina.

ABSTRACT

The use of thermite welding technology on railway connection is the primary option due to its mobility and cost. There are many failures on railway used to transport large amount of coal. This study performed a series of examinations and tests to find the main cause of broken railway connections. Macro fractographic test showed chevron fracture pattern and ratchet mark as indication of crack initiation area, which was the centerline of welding area. Metallographic examination on crack initiation areas showed weak ferrite phase network with large perlite grains. It was also found a number of micro porosity which supported the result of fractographic examination. Micro fractographic examination by Scanning Electron Microscope (SEM) showed a typical brittle fracture and a lot of micro porosity. Chemical composition examination by Energy Dispersive Spectrometer (EDS) showed an alumina inclusion slag. Therefore, low quality of thermite welding connection was caused by initial crack from the inside in the form of micro porosity in the centerline of welding area.

Keywords : *railway rail, thermite welding, interdendritic shrinkage porosity, ferrite networks, alumina slag inclusion.*

PENDAHULUAN

Infrastruktur jaringan rel kereta api dirintis oleh pemerintahan Belanda di pulau Jawa dan Sumatera. Transportasi kereta api awalnya diperuntukkan bagi angkutan barang. Pilihan jenis transportasi ini karena memiliki tingkat

konsumsi bahan bakar minyak (BBM) per km dan per orang terendah dibandingkan moda transportasi lain, yaitu 0,002 liter per km [1]. Tidak hanya sebagai angkutan barang, transportasi kereta api menjadi pilihan utama untuk angkutan manusia dewasa ini. Oleh karena itu, kereta api adalah jenis transportasi yang

paling efisien untuk dikembangkan sebagai transportasi masal.

Penggunaan kereta api sebagai angkutan logistik batubara telah lama digunakan di Sumatera Selatan. Berdasarkan kapasitas beban kereta api, klasifikasi jalan rel termasuk kelas I, yaitu kapasitas angkut lintas di atas 20×10^6 ton/tahun. Setiap gerbong mengangkut batubara dengan beban sekitar 50 ton. Sedangkan berat gerbongnya sendiri 22 ton. Pemilihan tipe rel disesuaikan dengan beban yang diterima oleh rel. Tipe rel yang digunakan adalah R.54 [1].



Gambar 1. Kereta Api Angkutan Batubara

Berdasarkan klasifikasi jalan rel, kombinasi kecepatan dan beban yang diterima disesuaikan dengan kemampuan baja rel. Namun pada kasus ini, pertimbangan beban lebih diperhatikan, karena tidak ada batas atas kelas rel tipe I. Permasalahan muncul dengan telah terjadinya kerusakan berupa patah rel pada hampir semua sambungan.



Gambar 2. Kerusakan di Sekitar Sambungan Rel Setelah Pemakaian

Teknologi penyambungan rel kereta api yang dimiliki oleh PT Kereta Api Indonesia (PT KAI) hanya las termit sampai saat ini. Teknologi ini umum digunakan di berbagai negara karena memiliki kelebihan, diantaranya harga yang relatif murah, mobilitas yang tinggi, dan keahlian operator yang relatif tidak sulit [2]. Pengelasan termit dikembangkan oleh Goldschmidt pada tahun 1986. Pengelasan termit adalah suatu proses menghubungkan ujung logam dengan pemanasan tinggi sehingga mengakibatkan reaksi

antara serbuk besi dan alumina [3]. Namun kualitas hasil las termit tidak sebaik teknologi pengelasan yang lain, misalnya *flash butt welding*. Beberapa kelemahan hasil pengelasan termit diantaranya: keuletan dan ketangguhan yang rendah, butir yang kasar, struktur dendritik, inklusi dan terbentuknya porositas [4,5]. Terbentuknya porositas pada pengelasan termit dapat berasal dari berbagai sumber, diantaranya: gas yang terlarut dalam logam cair; porositas gas; dan porositas penyusutan [4]. Porositas dan inklusi akan menurunkan ketahanan lelah sambungan las akibat retak internal.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui penyebab utama terjadinya kegagalan pada sambungan las termit rel kereta api. Dengan demikian dapat diketahui perbaikan proses pengelasan las termit yang harus dilakukan.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Potongan rel kereta api yang telah mengalami kerusakan (Gambar 2 dan 3). Informasi data teknis adalah sebagai berikut:

Identitas Barang	: Rel Kereta Api
Tipe	: R.54 (54 kg/m) berdasarkan UIC
Spesifikasi Material	: JIS E 1120 : 2007 <i>Head hardener rails</i>
Jenis Sambungan	: Las Termit
Kelas Jalan Rel	: Kelas I

Metode

Penelitian ini dimulai dengan informasi kronologi kejadian dan data teknis yang diberikan untuk memberi gambaran awal kerusakan. Selanjutnya dilakukan pemilihan jenis pemeriksaan dan pengujian sebelum dilakukan pemotongan dan pembuatan spesimen uji. Terdapat 4 potongan rel kereta yang dapat di bagikan ke dalam 3 kelompok, yaitu 2 potongan rel dan pasangan patahan rel kereta dekat sambungan las (Gambar 2).



Gambar 3. Rel Kereta Api Tipe R.54 yang rusak.

Adapun rangkaian pemeriksaan atau pengujian tersebut terdiri dari [6]:

- Pengamatan visual untuk melihat bentuk, warna dan lokasi kerusakan.
- Pengamatan fraktografi secara makro untuk menentukan bentuk dan arah perambatan retakan.
- Pengujian komposisi kimia, uji tarik, dan uji keras sebagai verifikasi material rel kereta api. Verifikasi material dilakukan terhadap 2 sampel material sisi kiri dan kanan sambungan rel. Pemeriksaan komposisi kimia menggunakan *Optical Emission Spectrometry* (OES) merk spectro yang dapat menentukan unsur-unsur termasuk karbon (ASTM A751-14a)
- Pemeriksaan metalografi untuk melihat perubahan struktur mikro dan kekerasan. Pengujian ini mengikuti standar ASTM E 407-07. Lokasi pemeriksaan dilakukan pada daerah yang diduga sebagai awal retakan. Serangkaian tahapan preparasi dilakukan, diantaranya : pemotongan, *mounting*, poles, dan pemberian larutan etsa. Larutan etsa yang digunakan adalah nital 3%.
- Pemeriksaan dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan untuk mengetahui morfologi dan fraktografi secara mikro permukaan patahan beserta komposisi kimia permukaan dan *Electron Dispersive Spectroscopy* (EDS)

Semua data primer dan sekunder dianalisa secara komprehensif dan didukung dengan studi literatur sehingga diperoleh penyebab utama kerusakan.

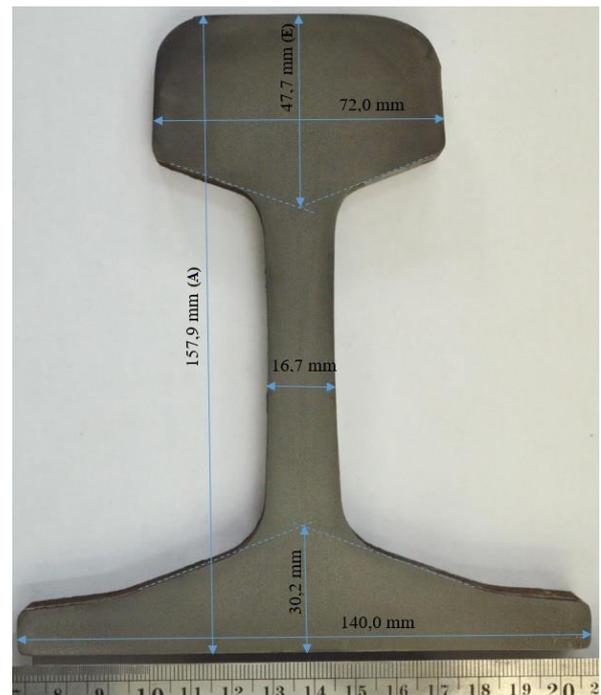
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemeriksaan Visual dan Dimensi

Pengamatan visual diawali dengan melihat keseluruhan secara umum komponen rel yang patah (Gambar 2 dan 3). Lokasi patahan berada di sekitar sambungan las dan melewati bagian batang rel. Arah patahan pada daerah *head* dan *bottom* cenderung tegak lurus terhadap arah rel, sedangkan pada batang bervariasi.

Foto dan dimensi tampak melintang rel tipe R.54 secara utuh yang diperlihatkan pada Gambar 4. Hasil pengukuran dimensi sesuai dengan *International Union of Railway UIC 1986* untuk tipe R.54, kecuali ketinggian keseluruhan A akibat tinggi bagian *head* E yang menurun [7]. Berdasarkan standar, dimensi A adalah 159,0 mm dan dimensi E adalah 49,4. Penurunan

dimensi tinggi di daerah *head* diduga karena mengalami keausan selama pemakaian



Gambar 4. Tampak Melintang Rel dan Dimensinya.

Pemeriksaan Fraktografi

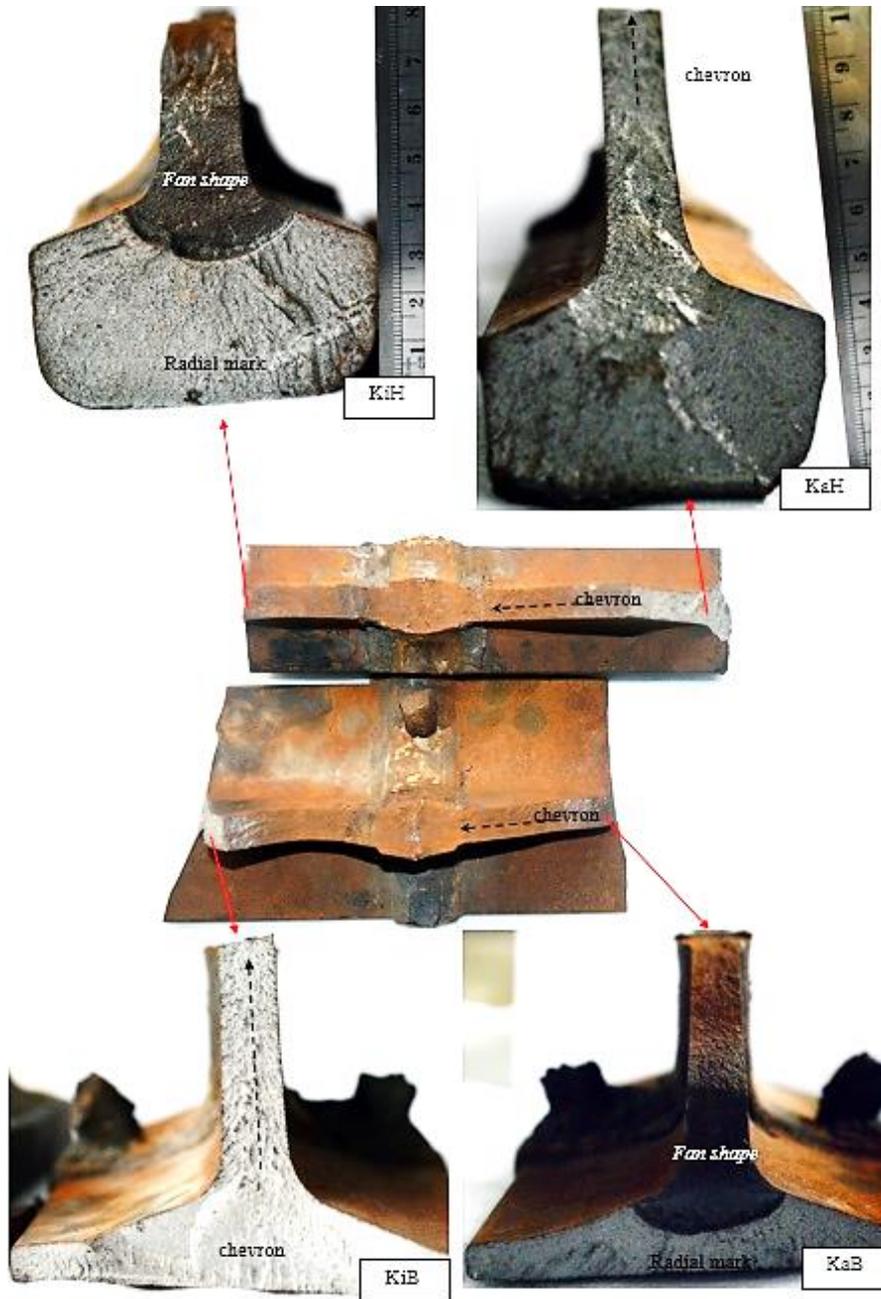
Pemeriksaan fraktografi untuk melihat bentuk patahan sehingga dapat ditentukan lokasi awal retakan. Diawali dengan melihat tampak samping tepi patahan pada sambungan las yang menunjukkan keberadaan pola *ratchet mark* (lingkaran merah pada gambar 5). Pola ini merupakan salah satu indikasi patahan lelah yang dapat menunjukkan inisiasi retakan. Selanjutnya, pasangan patahan bagian *head* dan *bottom* dibuka untuk melihat kondisi permukaan patahan secara keseluruhan pada gambar (gambar 6 dan 7)



Gambar 5. Pola *Ratchetmark* pada Sambungan Las Termit.

Secara umum, kondisi korosi permukaan patahan dapat dibagi 2 berdasarkan warnanya yaitu coklat dan cerah mengkilap. Bagian yang berwarna coklat cenderung berada pada permukaan patahan yang memisahkan bagian *head* dan *bottom* rel. Sedangkan yang relatif bersih berwarna cerah mengkilap cenderung berada pada permukaan patahan yang

memisahkan rel dengan sisi sebelahnya, tanpa melewati sambungan las. Berdasarkan kondisi korosi terlihat bahwa yang berwarna coklat mengalami patahan terlebih dahulu dan diakhiri dengan yang berwarna cerah mengkilap. Jadi awal retakan yang menyebabkan patahan terjadi berada di daerah yang berwarna coklat.

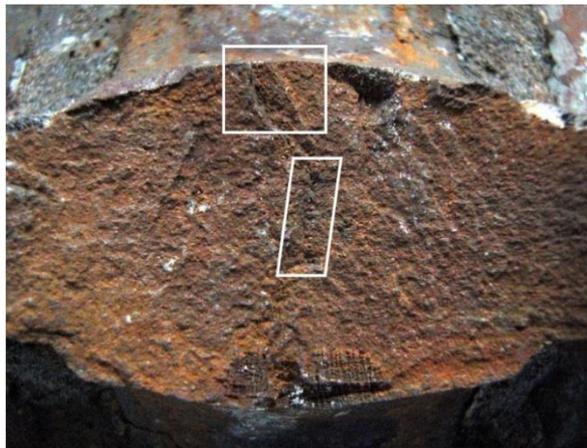


Gambar 6. Kondisi Permukaan Patahan Rel Tipe R.54

Kondisi permukaan patahan tahap pertama memperlihatkan pola pasangan *chevron* dengan jelas pada sisi kanan sambungan las termit. Pola *chevron* menunjukkan bahwa arah rambatan berasal dari sambungan las (garis hitam putus-

putus). Hal ini mendukung indikasi sebelumnya bahwa awal retakan berada di daerah logam las. Keberadaan pola ini sebagai indikasi pertumbuhan retak yang tidak stabil, yaitu patahan getas.

Kondisi permukaan patahan tahap kedua diperlihatkan dengan kode gambar KiH (kiri bagian *head*), KaH (kanan bagian *head*), KiB (kiri bagian *bottom*), dan KaB (kanan bagian *bottom*). Pola yang sama ditunjukkan pada gambar KiH dan KaB, yaitu bagian patahan tahap pertama diakhiri permukaan yang berbentuk kipas dan lebih gelap (*fan shape*). Meskipun *fan shape* merupakan tipikal patahan lelah, namun tidak ditemukan *beachmark*. Hal inilah yang menyebabkan warnanya lebih gelap sebelum penjarangan retak terjadi seketika pada area *radial mark* [6].



Gambar 7. Kondisi Permukaan Patahan pada Daerah Las

Jadi, berdasarkan pemeriksaan fraktografi makro secara keseluruhan tidak menunjukkan pola *beachmark* sebagai indikasi patah lelah. Hanya ditemukan pola *chevron* yang memberi petunjuk sumber retakan, yaitu daerah las [6]. Namun ditemukan pola *ratchet mark* pada daerah las, tipikal lain yang menunjukkan patah lelah. Semua rangkaian pemeriksaan fraktografi menunjukkan bahwa pada inisiasi retakan ada pengaruh beban lelah. Sedangkan perambatan retakan menunjukkan patahan getas.

Lokasi inisial retakan berada di tengah daerah web. Berdasarkan perhitungan tegangan sisa tarik, daerah tersebut memiliki nilai terbesar. Akibatnya adanya cacat berupa porositas akan mudah menjadi awal retakan.

Verifikasi Material Rel Tipe R.54

Serangkaian pengujian dilakukan terhadap rel sebagai verifikasi material. Beberapa jenis pengujian yang dilakukan antara lain: komposisi kimia, uji keras dan uji tarik. Seluruh pengujian

mengacu kepada standar JIS E 1120 : 2007 tentang *Head hardened rails* untuk melihat kesesuaian material [8].

1. Komposisi Kimia

Pemeriksaan komposisi kimia dilakukan terhadap 2 sampel. Sampel pertama diambil pada bagian *head* potongan rel BLT (sampel 1) dan KPY (sampel 2) yang utuh. Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan metoda *Optical Emission Spectroscopy* (OES) untuk mengetahui kesesuaiannya terhadap spesifikasi material tersebut (Tabel 1).

Tabel 1. Hasil Komposisi Kimia pada Rel Tipe R.54 (% berat)

Unsur	Sampel ke-1 (<i>head</i> -BLT)	Sampel ke-2 (<i>head</i> -KPY)	JIS E 1120 : 2007 Tipe HH370
C	0,757	0,710	0,72 – 0,82
Si	0,244	0,307	0,10 – 0,65
Mn	1,03	0,994	0,80 -1,20
P	0,0236	0,0183	Maks. 0,03
S	0,0098	0,0225	Maks. 0,02
Cr	0,205	0,0361	Maks. 0,25
Mo	0,0027	0,0031	-
Ni	0,0125	0,0205	-
Al	0,0038	0,0040	-
Cu	0,0164	0,0416	-
V	0,00073	0,00014	Maks. 0,03

Hasil pengujian menunjukkan bahwa material baja termasuk kategori baja karbon tinggi dengan unsur pemuat utama adalah mangan sekitar 1%. Secara umum kedua sampel pengujian memenuhi spesifikasi komposisi kimia JIS E 1120 : 2007 tentang *Head hardened rails*. Kandungan karbon pada salah satu sampel sedikit di bawah spesifikasi. Namun terdapat sedikit perbedaan komposisi paduan, khususnya kandungan krom pada kedua sampel. Meskipun kedua hasil uji masuk spesifikasi WR-A [1], namun tingkat homogenitas komposisi kimia keduanya relatif rendah.

2. Uji Tarik

Pengujian kekuatan tarik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik rel. Lokasi pengambilan spesimen uji tarik berada di daerah *head*. Disiapkan 2 spesimen yang berasal dari kedua potongan rel yang utuh. Pengujian ini menggunakan standar ASTM A 370-2012. Hasil uji tarik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Kuat Tarik

	Spesimen ke-1	Spesimen ke-2
Kuat Tarik, kgf/mm ² (MPa)	128,8 (1264)	96,7 (948)
Kuat Luluh, kgf/mm ² (MPa)	97,3 (954)	89,6 (879)
Regangan (%)	10,8	12,6

Hasil pengujian kekuatan tarik dan regangan sesuai standar JIS E 1120 : 2007, kecuali nilai uji tarik spesimen ke-1.

3. Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan terhadap permukaan pada bagian *head*. Metode yang digunakan adalah *Brinell*. Pengujian dilakukan dengan beban 750 kgf, diameter indenter 5 mm, dalam waktu 15 detik. Preparasi dan hasil uji dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Foto Hasil Uji *Brinell* pada Permukaan *Head*

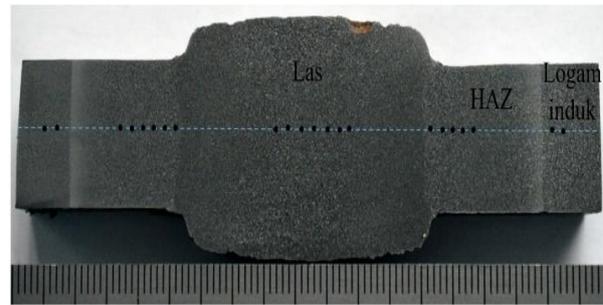
Tabel 3. Hasil Uji Kekerasan pada Permukaan *Head*

No.	Permukaan <i>Head</i>		JIS E 1120 : 2007
	BLT	KPY	
1.	341	341	331-388 Untuk HH370
2.	363	321	
3.	363	341	
	355,7	334,3	

Hasil pengujian kekerasan pada permukaan sesuai dengan standar JIS E 1120 : 2007, kecuali nilai uji tarik spesimen ke-1.

Pemeriksaan Makro dan Kekerasan

Pengujian makro dilakukan untuk melihat sambungan las termit. Lokasi pengambilan sampel adalah tampak melintang di bagian badan rel. Foto hasil uji makro ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Foto Makro dan Lokasi Uji Keras Vickers Rel Kereta Api Tipe R.54 pada Sambungan Las Termit

Secara visual makro terlihat seperti pengkasaran ukuran butir pada daerah tengah las. Pengujian kekerasan juga dilakukan pada spesimen makro yang dapat membedakan daerah las, HAZ (daerah pengaruh panas), dan logam induk. Metode uji keras adalah uji *Vickers* dengan beban 10 kgf.

Tabel 4. Hasil Uji Kekerasan

No.	Logam induk	HAZ (Daerah pengaruh las)	Las
1.	276	285	365
2.	270	289	363
3.	268	285	357
4.	274	289	357
5.	-	297	348
6.	-	292	357
7.	-	327	363
8.	-	302	-
9.	-	297	-
10.	-	297	-
Rata-rata	272,0	296,0	358,6

Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada daerah las jauh lebih tinggi dibandingkan logam induk, yaitu kenaikan lebih dari 30%. Adanya kenaikan nilai kekerasan pada daerah las menunjukkan bahwa proses pengelasan termit ini memerlukan perlakuan panas setelah pengelasan termit untuk memperbaiki sifat getasnya [9]. Nilai kekerasan ini diduga akan menyebabkan daerah las lebih rentan terhadap penjalaran retakan jika ditemukan inisiasi retakan, misalnya jaringan ferit, inklusi atau porositas.

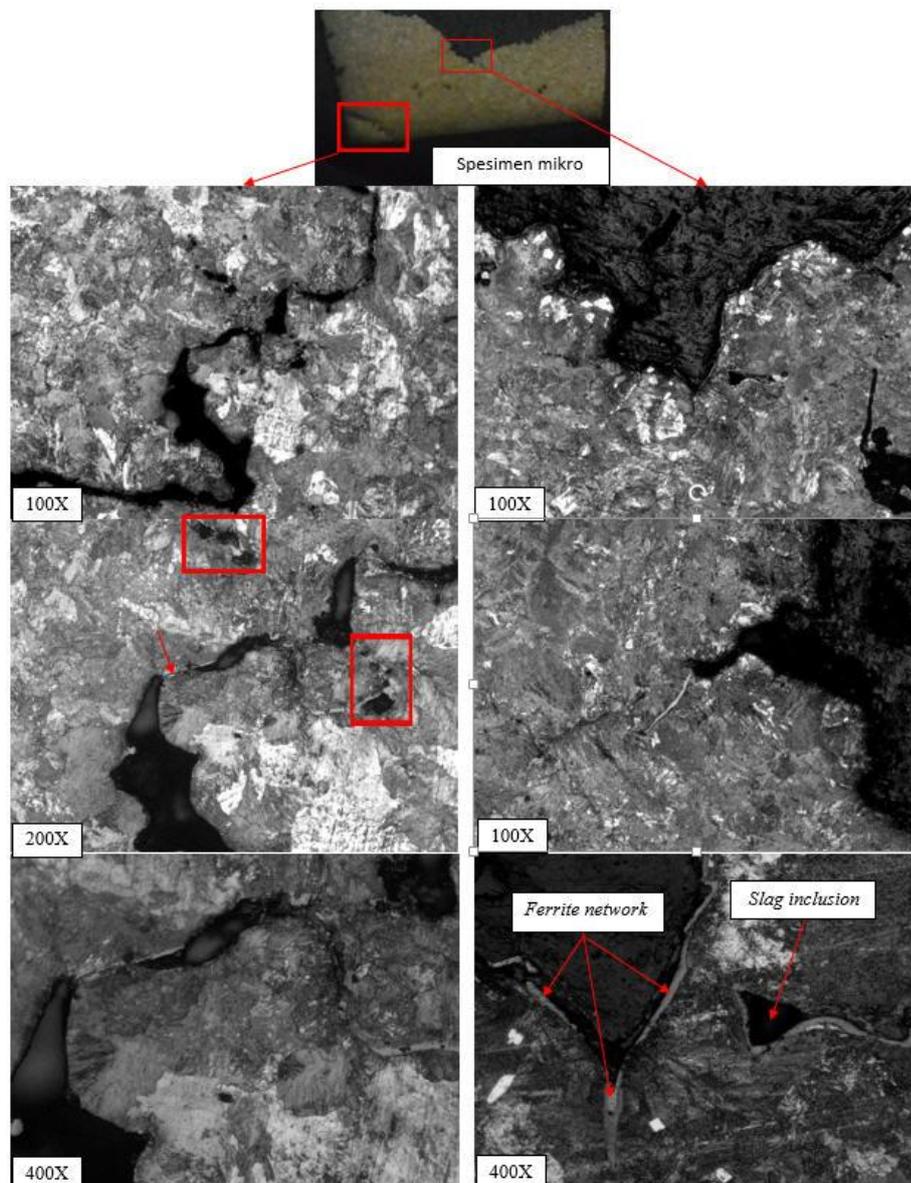
Pemeriksaan Metalografi

Pemeriksaan metalografi dilakukan terutama pada daerah yang diduga menjadi inisiasi retakan, yaitu daerah las termit. Berdasarkan pemeriksaan sebelumnya, awal retakan berada di *centerline* yaitu fusi daerah las pertemuan antar ujung rel sekitar takikan (Gambar 7 dan 10). Seperti diketahui bahwa awal retakan di tengah daerah *web* rel kereta api. Berdasarkan pengamatan, daerah tersebut mengalami tegangan sisa tarik tertinggi sehingga paling rentan menjadi inisiasi retakan [10].

Hasil pemeriksaan struktur mikro dengan berbagai kondisi dan pembesaran diperlihatkan pada Gambar 10. Secara umum, retakan melewati

batas butir perlit. Ditemukan lapisan tipis berwarna putih pada permukaan yang dilewati retakan. Lapisan putih pada batas butir tersebut diduga jaringan ferit [11,12]. Lapisan tipis ferit ini sangat lemah dibandingkan koloni perlit yang ada sehingga mudah dilalui retakan.

Namun ditemukan kluster mikro porositas (kotak merah). Bentuk porositas cenderung tidak bulat. Bentuk dan lokasi di *centerline* memberi dugaan tipe porositas akibat penyusutan. Porositas akan menurunkan kemampuan sambungan rel terhadap beban lelah. Beban maksimum yang seharusnya dapat diterima akan menurun.



Gambar 10. Struktur Mikro pada Penampang Melintang Daerah yang Diduga sebagai Inisiasi Retakan di *Centerline* Tengah Bagian *Web* Sambungan Las Termit Rel Kereta Api.

Gambar 10 memperlihatkan adanya jaringan ferit (putih) pada permukaan retakan. Perbandingan kondisi struktur mikro daerah awal retakan berbeda dibandingkan daerah penjalaran retakan lanjutan (logam induk). Selain keberadaan jaringan ferit, juga ukuran butir perlit lebih besar. Ukuran butir yang lebih besar akan menurunkan nilai ketangguhan pada daerah tersebut.

Perbedaan ukuran butir diperlihatkan pada Gambar 11. Ukuran butir daerah las dibandingkan terhadap ukuran butir logam induk rel pada daerah permukaan patahan *chevron* dan *fan shape*. Meskipun ukuran butir sangat beragam, namun ukuran butir daerah las (fusi las) memperlihatkan peningkatan ukuran butir lebih dari empat kali lebih besar.



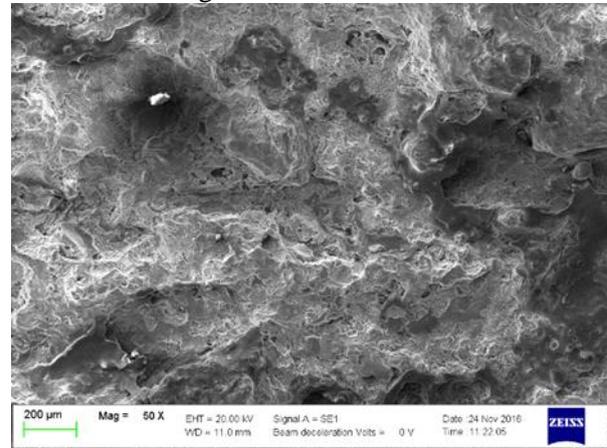
Gambar 11. Perbedaan Ukuran Butir di Daerah Las, Logam Induk di *Fan Shape*, dan *Chevron*

Selain itu ditemukan indikator terbentuknya cacat slag inklusi (Gambar 11). Berdasarkan kluster porositas juga memberi indikasi tipe B, alumina berdasarkan ASTM E 45 [13]. Pada pengelasan termit, peluang ditemukannya inklusi alumina (Al_2O_3) lebih besar dibandingkan mangan sulfida (MnS). Sifat sangat keras, getas, dan bentuk pipih tidak memberi petunjuk bahwa lapisan tipis putih yg lebih tebal tersebut adalah inklusi alumina. Pemeriksaan keberadaan alumina akan dilakukan pada pemeriksaan SEM/EDS.

Pemeriksaan SEM dan EDS

Pemeriksaan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan terhadap bagian permukaan patahan pada daerah las (Gambar 5) pada pemeriksaan fraktografi. Pemeriksaan ini dilakukan untuk mengetahui morfologi mikro permukaan. Bersamaan dengan pemeriksaan

SEM, dilakukan pula pemeriksaan komposisi kimia secara semi kuantitatif terhadap celah atau bukaan retakan. Metode ini dinamakan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). Merek peralatan SEM/EDS yang digunakan adalah ZEISS EVO. Potongan sampel yang akan diperiksa dibersihkan dengan alkohol.



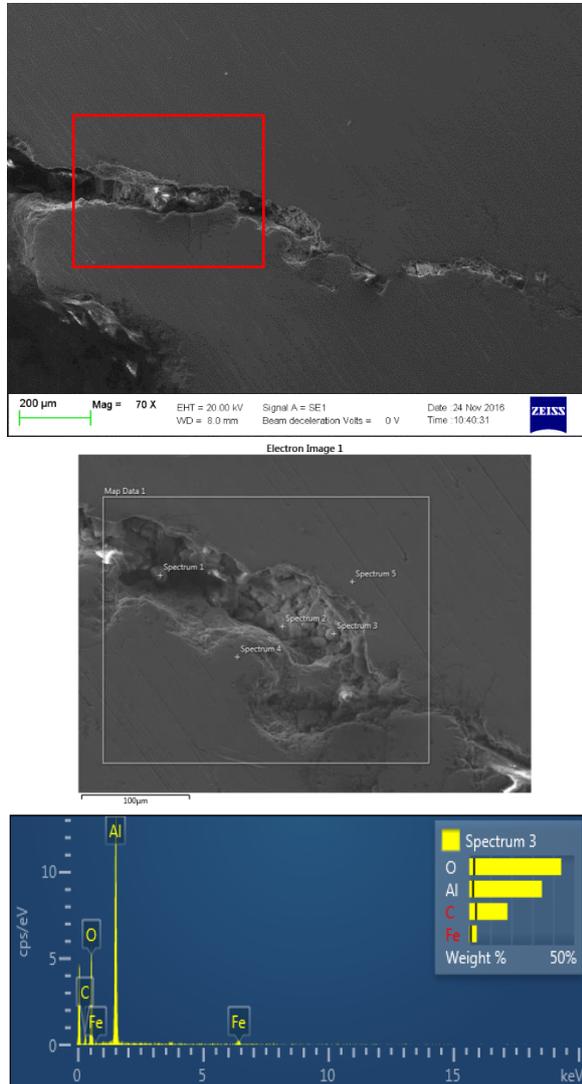
Gambar 12. Porositas pada Daerah Inisiasi Retakan

Pada pemeriksaan SEM berdasarkan indikasi awal retakan hasil pemeriksaan sebelumnya, yaitu daerah fusi sambungan las, ditemukan banyak porositas yang dapat menjadi pemicu awal terjadinya retakan. Cacat-cacat yang ditemukan pada daerah fusi las dapat berupa porositas atau inklusi slag berdasarkan detail bentuknya pada pemeriksaan metalografi (Gambar 10). Keberadaan sejumlah inklusi dan kekosongan akibat interdendritik diduga penyebab terbentuknya porositas mikro [4]. Selain itu ditemukan beberapa permukaan yang cenderung datar dan berwarna lebih gelap.

Penurunan tekanan disebabkan oleh aliran cairan yang melalui struktur dendrit. Dengan bantuan evolusi gas selama solidifikasi, kondisi yang memungkinkan terbentuknya kluster porositas pada daerah *centerline* [4]. Porositas mikro selalu ditemukan pada daerah interdendritik [4].

Dendritik adalah bentuk struktur memanjang akibat proses pendinginan logam cair. Butir perlit yang lebih besar akan mengakibatkan jarak antar dendritik (*dendritic arm spacing*) menjadi lebih besar. Berdasarkan penelitian Poirier et al [14] tentang porositas interdendritik bahwa semakin besar jarak antar dendritik [DAS] akan memudahkan terbentuknya porositas interdendritik.

Pemeriksaan komposisi kimia pada celah retakan yang terbentuk sendiri karena getas pada preparasi sampel uji (Gambar 13). Hasil pemeriksaan menunjukkan adanya unsur aluminium dalam jumlah yang cukup signifikan, tetapi tidak ditemukan unsur lain yang menunjukkan adanya jenis inklusi tambahan. Jadi, dapat disimpulkan bahwa jenis inklusi adalah alumina.



Gambar 13. Foto SEM dan EDS pada Permukaan Patahan

Serangkaian pemeriksaan yang terdiri dari visual, fraktografi (makro), metalografi, uji keras, SEM/EDS telah dilakukan. Dengan mengamati kronologi kejadian dan data teknis akan memberikan indikasi penyebab kerusakan. Meskipun rel kereta api menerima beban lelah, namun tidak mudah menemukan tanda-tanda patah lelah pada pemeriksaan fraktografi. Pada pemeriksaan fraktografi secara makro tidak

ditemukan *beachmark* sebagai tipikal patah lelah, kecuali sedikit *ratchet mark* di daerah las. Pola ini hanya memberi petunjuk lokasi inisiasi retakan. Adanya pola *chevron* memberi petunjuk bahwa arah pergerakan retakan berasal dari daerah las.

Sedangkan pemeriksaan fraktografi secara mikro dengan SEM juga tidak menemukan *fatigue striation* sebagai tipikal patah lelah. Pada pemeriksaan tersebut ditemukan *cleavage fracture* dan *river pattern* yang kotor karena telah mengalami korosi. Semua ini menunjukkan bahwa awal retakan yang terjadi adalah patah getas (antar butir). Sedangkan perambatan retak dapat berupa kombinasi. Pada patah getas relatif tidak terjadi deformasi plastik, berlangsung sangat cepat dan sifat ketangguhan yang rendah (mudah retak pada penyiapan spesimen metalografi dan SEM). Jadi dapat disimpulkan bahwa kerusakan rel diakibatkan oleh beban berlebih meskipun mengalami beban lelah.

Kondisi abnormal struktur mikro pada daerah retakan yaitu ditemukannya jaringan ferit pada retakan di batas butir perlit yang merupakan lokasi awal retakan. Indikasi yang sama tidak ditemukan pada struktur mikro patahan di daerah logam induk (*chevron* dan *fan shape*). Selain itu, dengan ditemukannya slag inklusi alumina menunjukkan rendahnya kualitas fusi las. Untuk mengatasi hal ini, teknologi pengelasan perlu ditingkatkan dan beban angkutan dikontrol untuk mencegah kegagalan serupa di masa mendatang.

KESIMPULAN

Berdasarkan serangkaian pemeriksaan dan pengujian terhadap patahan rel kereta api dapat disimpulkan bahwa kualitas proses pengelasan termit rendah. Pola patahan *chevron* pada pemeriksaan fraktografi secara makro memberikan petunjuk bahwa awal retakan berada di *centerline* daerah las. Ukuran butir yang lebih besar dan nilai kekerasan yang lebih tinggi pada daerah tersebut menunjukkan pemanasan awal tidak dilakukan pada proses pengelasan. Adapun pergerakan retakan melalui batas butir berupa jaringan ferit halus yang lemah. Selain itu, kluster porositas mikro dan inklusi alumina mudah ditemukan pada batas butir tersebut. Kondisi ini akan memperlemah batas butir.

SARAN

Berdasarkan analisa dan kesimpulan, dapat diberikan beberapa saran sebagai berikut :

1. Perlu dipastikan perlakuan pemanasan awal yang cukup agar tingkat kelembaban rendah sehingga mengurangi terbentuknya porositas mikro di daerah *centerline* las.
2. Jika memungkinkan dibuat *welding procedure specification* beserta *procedure qualification record* (WPS/PQR) sebagai *standard operation procedure* (SOP) baku untuk peningkatan kualitas.
3. Dilakukan modifikasi teknologi, yaitu "Squeeze Welding" dengan menekan kedua ujung rel sehingga bagian logam cair yang akan membentuk porositas dapat dikeluarkan.
4. Dilakukan perlakuan panas setelah proses las termit untuk memperbaiki sifat getas.
5. Dilakukan pemeriksaan radiografi untuk semua spot sambungan las untuk melihat kondisi *cluster* porositas.
6. Hindari pemukulan berlebihan setelah proses las untuk pembersihan kerak.
7. Untuk sementara dilakukan pengurangan beban batu bara seperti awal.
8. PT KAI perlu memiliki alternatif teknologi pengelasan sambungan rel.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Rekan-rekan di laboratorium metalografi B4T atas kerjasama dan kesempatan yang diberikan dalam pemecahan kasus analisa kerusakan ini.
2. PT Kereta Api Indonesia (PT KAI) divisi pemeliharaan dan keselamatan atas kerjasama dan kepercayaan yang diberikan pada B4T.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suryo Hapsoro Tri Utomo, "Jalan Rel", *Beta Offset*, Yogyakarta, 4–25, 2009.
- [2] Saita, K., Karimine, K., & Ueda, M., "Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach", *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, (105), 84–92, 2013.
- [3] AWS, *Welding Handbook Vol. 3*, 9th edition, *Welding Process, Part 2*, American Welding Society, 573–580, 2007.
- [4] Chen, Y. A., F. V. Lawrence, C. P. L. Barkan, and J. A. Dantzig. "Weld Defect Formation in Rail Thermite Welds", 220: 373–84, 2006. doi:10.1243/0954409JRRT44.
- [5] Deep, "A. Improvement in Mechanical Behavior of Expulsion with Heat Treated Thermite Welded", 3(12), 1545–1549, 2009.
- [6] ASM, *Metal Hand Book Vol. 11*, 5th Printing, *Failure Analysis and Prevention*, American Society for Metal, Hal 164–171, 1995.
- [7] TATA Steel. "Rail Technical Guide", 1–24, 2013. doi:RTG/LJ/ENG/V2/04.14.
- [8] *JIS E 1120:2007* "Head hardened rails".
- [9] Nenad, Milan T. Jovanović, Miša Todorović, Milan Trtanj, and Petar Šaponjić. "Microstructural and Mechanical Characterization of Postweld Heat-Treated Thermite Weld in Rails." *Materials Characterization* 43 (4): 243–50, 1999. doi:10.1016/S1044-5803(99)00006-6.
- [10] Jun, Hyun Kyu, Jung Won Seo, Il Sik Jeon, Sang Hwan Lee, and Yoon Suk Chang. "Fracture and Fatigue Crack Growth Analyses on a Weld-Repaired Railway Rail." *Engineering Failure Analysis* 59, 2016. doi:10.1016/j.engfailanal.2015.11.014.
- [11] Li, Y.D., C.B. Liu, N. Xu, X.F. Wu, W.M. Guo, and J.B. Shi. "A Failure Study of the Railway Rail Serviced for Heavy Cargo Trains." *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. Vol. 1, 2013. doi:10.1016/j.csefa.2013.09.003.
- [12] Lawrence, F.V., Y-R. Chen, J.P. Cyre, and C.P.L. Barkan. "Strategies for Improving the Fatigue Resistance of Thermite Weldments", 2001.
- [13] ASTM E 45–05 "Standar Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel".
- [14] Poirier, D. R., Yeum, K., and Maples, A. L. "A thermodynamic prediction for microporosity formation in aluminum-rich Al-Cu alloys". *Metall. Trans. A*, 1987, 18A, 1979.