e-ISSN : 2621-5934
p-ISSN : 2621-7112

SUBMISSION 12

Porositas Dan Penetrasi Tidak Sempurna Di Area Bawah Lasan Pada Sambungan Las Aluminium Struktur Kereta Api Ringan

Hary Soebagyo[11], dan Hernadi[2]

[1]Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, 12640, Jakarta, Indonesia
[2]Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS)- BPPT, Indonesia

Abstrak. Struktur kereta api ringan (Light Rapid Transit) umumnya sebagian besar dibuat dari bahan paduan aluminium. Struktur tersebut dalam prosesnya juga banyak menggunakan sambungan las. Pada proses pengelasan yang dilakukan masih sangat dimungkinkan terjadinya cacat las mengingat paduan aluminium mempunyai titik leleh rendah, ikatan antar atomnya yang kurang kuat dan juga bersifat getas. Cacat pengelasan dapat berupa porositas atau lubang mikro dan apabila struktur terbebani terus menerus cacat tersebut akan dapat menjadi penyebab sumber keretakan awal (initial crack) yang beresiko merambat sedemikian rupa hingga struktur dapat mengalami patah lelah. Oleh karena itu untuk mencegah terjadinya patah dan juga sebagai upaya pencegahan, maka perlu dilakukan serangkaian pemeriksaan awal pada sambungan las struktur dengan berbagai metode seperti ultrasonic, radiografy, fraktografy dan metallografy. Pemeriksaan dengan metode fraktografi dan metallografy pada penelitian ini dimaksudkan untuk memastikan ada atau tidak adanya cacat yang bersifat mikroskopik di area bawah lasan. Dari pemeriksaan fraktografy dan metallografy yang dilakukan ini ternyata masih didapati cacat mikro berupa porositas dan penetrasi tidak sempurna di daerah bawah lasan (*root band*) sesuai dengan indikasi awal yang telah diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya dengan pemeriksaan radiografy. Dengan mengetahui cacat las lebih awal, upaya koreksi masih dapat dilakukan untuk memperbaiki proses pengelasan guna mengurangi resiko terjadinya gagal fungsi dari struktur kereta api ringan pada saat operasinya.

Kata Kunci- Cacat las; Penetrasi; Porositas; Sambungan las; Struktur kereta, Struktur mikro.

1. PENDAHULUAN

Salahsatu jenis kendaraan berbasis rel yang sekarang mulai banyak dikembangkan pemakaiannya di Indonesia adalah kereta api ringan atau LRT (*Light Rapid Transit*), istilah ini seperti yang disebutkan dalam Lembar Negara RI [1], meskipun ada pula yang menyebutnya dengan nama lain, yaitu Lintas Rel Terpadu.

Kendaraan berbasis rel jenis ini merupakan salah satu angkutan massal yang cukup efektif untuk mengatasi masalah transportasi di daerah perkotaan atau wilayah metropolitan karena selain dapat mengangkut banyak penumpang, juga cukup terjamin akan kenyamanan dan keamanannya. Kehadiran kereta api ringan yang nyaman dengan jaminan tepat waktu untuk beroperasi di kota-kota besar yang tumbuh menjadi kota metropolitan tersebut akan dapat mengubah perilaku masyarakat dari penggunaan kendaraan pribadi ke pemakaian kendaraan umum yang berbasis rel. Hal ini juga sekaligus dapat meningkatkan efektifitas dan efisiensi transportasi dan peningkatan kegiatan perekonomian di wilayah perkotaan yang kedepannya akan semakin padat.

Kereta api ringan yang untuk selanjutnya dalam tulisan ini disebut LRT jelas dapat mendukung pemenuhan kebutuhan transportasi masyarakat, terutama untuk menembus kemacetan lalu lintas di kota-kota besar. Tak mengherankan bila nanti banyak kota-kota besar di Indonesia yang segera akan mengikuti jejak DKI Jakarta untuk penggunaan LRT, meskipun diketahui pula bahwa ada resiko menimbulkan kebisingan lingkungan pada masyarakat perkotaan yang dilaluinya [2].

Mengingat penggunaanya yang semakin besar, rancang bangun LRT juga harus memenuhi berbagai hal penting *"Reliability, Availability, Maintainability and Safety"* (RAMS), yaitu aspek tentang Reliabilitas (kemampuan untuk melakukan fungsi tertentu yang andal), Ketersediaan (kemampuan untuk menjaga fungsi Dalam rangka memperhatikan aspek keselamatan, kekuatan dan keamanan dimana dibutuhkan struktur LRT yang kuat dan aman dalam operasinya, penggunaan bahan ringan dari aluminium ini perlu ada verifikasi baik dari tahap proses awal hingga proses akhir manufakturing strukturnya. Hal ini penting mengingat alumunium adalah bahan yang kerap mengalami porositas saat proses pengelasan dan mempunyai sifat yang lebih getas pada area yang terkena panas tinggi. Untuk mendukungnya dapat dilakukan berbagai penelitian eksperimental dengan menggunakan metode pemeriksaan dan metode pengujian terhadap spesimen struktur kereta guna memenuhi persyaratan standard tertentu. Penelitian atau pengujian dapat dilakukan mulai dari pemeriksaan awal yang menggunakan metode NDT (*Non Desturctive Test*) dan dilanjutkan dengan pengujian statis (*static test*) dan pengujian dinamis (*fatigue test*). Pengujian terutama diprioritaskan pada daerah sambungan las (*welding area*) dari struktur yang beresiko mengalami patah lelah. Metode pengamatan fraktografy dan metalografy perlu dilakukan dalam rangka memenuhi prosedur *Risk Basic Insppection* (*RBI*) sebagai dasar tindakan pencegahan pada analisis kemungkinan terjadinya kerusakan.

[1] * Corresponding author: hary.soebagyo@univpancasila.ac.id

e-ISSN : 2621-5934
p-ISSN : 2621-7112

Penelitian tentang sambungan las aluminium yang dikemukakan pada makalah ini dimaksudkan untuk mengetahui dan memastikan tentang masih ada atau tidak adanya cacat lasan akibat ketidaksempurnaan proses pengelasan pada sambungan las, serta mencari solusi untuk menghindari resiko gagal fungsi dari struktur kereta LRT. Hasil penelitian ini juga akan menjelaskan manfaat penggunaan metode fraktografy dan metallografy guna mengungkap ada atau tidak adanya cacat mikro serta menjelaskan bagaimana tipologi cacat pada sambungan las. Cacat mikro tersebut dapat beresiko mempengaruhi kekuatan sambungan las aluminium secara signifikan. Hal ini cukup penting untuk dipahami karena pada sambungan las aluminium dapat terjadi adanya lubang atau cacat mikro dimana pada lokasi tersebut akan terjadi tegangan sisa yang sangat tinggi yang memunculkan resiko terjadinya kerusakan fatal [4]. Dari pemeriksaan sambungan las aluminium struktur LRT yang dilakukan dengan menggunakan metode fraktografy dan metallografy sebagai kelanjutan dari pemeriksaan radiografy yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya, ternyata hasil pemeriksaan ini dapat diandalkan dan kemudian menjadi bahan pertimbangan awal guna memastikan langkah pengujian berikutnya pada sambungan las aluminium struktur kereta api ringan LRT.

2. METODOLOGI PENELITIAN

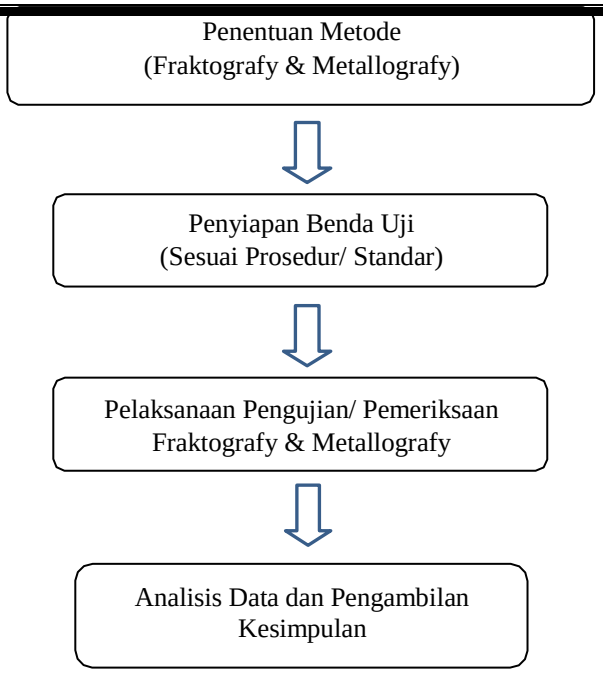
Kegiatan penelitian ini merupakan bentuk penelitian eksperimental, yaitu sebuah survey pemeriksaan menggunakan metode fraktografy dan metalografy terhadap benda uji dari hasil lasan bahan paduan aluminium yang digunakan untuk struktur LRT setelah sebelumnya dilakukan inspeksi awal menggunakan metode radiografy untuk melihat adanya indikasi cacat las. Dalam penelitian ini pembahasan difokuskan hanya pada pemeriksaan secara fraktografy dan metalografy dari benda uji lasan aluminium untuk struktur kereta LRT.

Tujuan penelitian ini adalah untuk memastikan ada atau tidak adanya cacat pada sambungan las struktur kereta api ringan dan sebagai lanjutan informasi dari hasil inspeksi visual yang telah dilakukan sebelumnya, serta untuk mengetahui secara umum struktur mikroskopik sambungan lasnya. Hasil pemeriksaan sebelumnya menggunakan uji ultrasonic dan uji radiografy mengindikasikan bahwa ada ketidaksempurnaan proses pengelasan dan ada kemungkinan terjadi cacat pada lokasi logam lasan (*weld metal*). [5].

Lebih lanjut, penelitian ini juga untuk mengantisipasi secara lebih dini (*preventive*) atas penyimpangan pada proses sambungan las aluminium tersebut. Semua kegiatan pemeriksaan tersebut dilakukan dalam rangka mendukung langkah awal penyiapan untuk pengujian kelelahan struktur kereta LRT agar dapat dipastikan keandalan dan keamananmya ketika beroperasi. Secara ringkas dapat digambarkan tahapan metodologi penelitiannya dalam diagram alir seperti pada gambar 1.

Penetapan topik penelitian merupakan hal pertama yang dilakukan, yaitu memilih topik tentang adanya masalah cacat sambungan las aluminium yang terjadi pada struktur kereta (*car body*) LRT. Hal ini juga karena kegiatan yang dilakukan adalah merupakan bagian dari serangkaian pengujian terhadap bagian penyangga utama kekuatan kendaraan berbasis rel ini. Selanjutnya ditentukan metode untuk pemeriksaan yang akan dipakai sebagai salah satu dasar untuk kegiatan pengujian berikutnya dalam rangka untuk mengetahui kekuatan dan keandalan struktur *car body* LRT dari bahan aluminium. Untuk itu ditetapkan metode yang dipilih adalah metode pemeriksaan metallografy dan metode fraktografy. Benda uji dipersiapkan dengan baik sesuai standar yang berlaku untuk kedua metode tersebut. Selanjutnya dilakukan pelaksanaan pengujian atau pemeriksaan dengan menggunakan kedua metode terpilih dan juga mengikuti prosedur serta standar masing-masing. Sudah banyak dipahami bahwa salah satu tujuan dari pemeriksaaan fraktografy lazimnya adalah untuk menentukan kegagalan retak atau bahkan patahannya. Metode fraktografy mengamati karakteristik model permukaan yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi model kegagalan & bagaimana lingkungan dapat mempengaruhinya. Pemeriksaan dan analisis fraktografy dilaksanakan mengacu kepada standar metode makroetsa logam dan paduan yakni ASTM [6]. Fraktografy adalah kegiatan uji visual yang lebih detail selain uji visual mata telanjang dengan perbesaran yang tidak terlalu tinggi (antara 6 s/d 25 kali). Sementara itu, metallografy adalah merupakan suatu disiplin ilmu yang menggunakan metode observasi atau pengamatan dan pengujian dengan tujuan untuk mempelajari hubungan antara struktur mikro dengan sifat atau karakteristik material uji dan peristiwa yang pernah dialami oleh logam atau paduan tersebut sebelumnya.

Tahapan berikutnya, setelah diperoleh hasil atau data dari pemeriksaan, kemudian dilakukan analisis terhadap data dan phenomena yang terjadi. Analisis fraktografy dan metallografy ini merupakan sumber informasi yang penting mengenai kondisi dan kualitas material lasan sambungan struktur kereta LRT yang diamati. Hasil analisis dari penggunaan kedua metode tersebut selanjutnya dirumuskan sebagai bahan untuk pengambilan kesimpulan dari hasil penelitian.



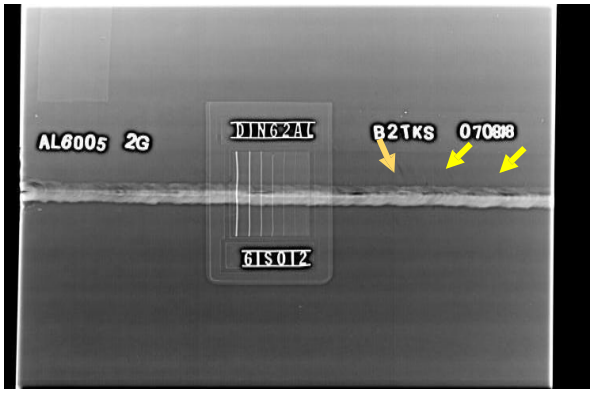
Gambar 1: Diagram Alir Kegiatan Penelitian

Selanjutnya, seperti diuraikan diatas, dalam pelaksanaan penelitian ini digunakan metode penelitian terhadap sambungan las aluminium struktur KRL secara eksperimental dengan menggunakan metode pemeriksaan metallografi dan fraktografi. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini adalah bagian dari sambungan las yang digunakan pada struktur kereta LRT (*Light Rapid Transit*) dan telah dilakukan inspeksi menggunakan metode *Radiographic Testing* dan *Ultrasonic* dari arah *face band* sambungan las [5], yang mana hasilnya menunjukkan indikasi adanya cacat. Proses pengelasan yang dilakukan untuk struktur LRT menggunakan metoda *Pulsed Gas Metal Arc Welding* dengan logam pengisi ER5356, maka benda uji dalam penelitian ini diambil dari proses yang sama. Data benda uji sambungan las ditunjukkan pada tabel 1, dimana dari tabel tersebut tampak spesifikasi dari benda uji yang berupa sambungan las plat paduan Aluminium seri Al 6005 dan standar pengujian mengacu kepada *American Welding Society* (AWS) [7].

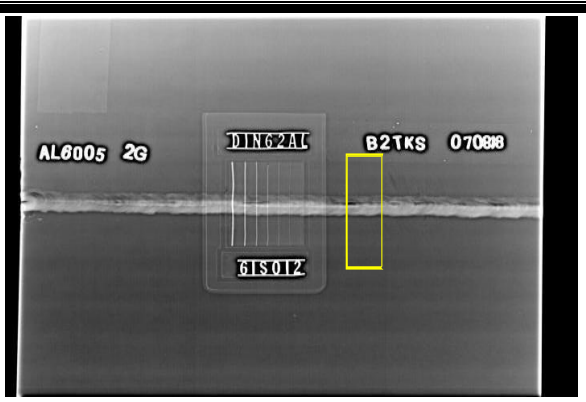
Tabel 1 : Benda Uji Sambungan Las

ITEM	**KETERANGAN**
Benda Uji	Sampel Sambungan Las Plat Aluminium Al 6005, V Groove; Complete Joint Penetration Temporary Backing Plate
Material	Aluminium Al 6005
Ukuran Benda Uji (tebal x lebar x panjang)	6,5 mm X 260 mm X 300 mm
Standar Pengujian dan Keberterimaan	AWS D 1.2 2012

Dari tabel 1 dapat diketahui bahwa bagian bahan struktur kereta LRT adalah pelat aluminium seri 6005 dengan tebal 6,5 mm yang dilas menggunakan metode pengelasan las GMAW. Benda uji diambil dari bagian yang diperiksan dengan metode radiografi dan ultrasonic dan dianggap mewakili kondisi sebagian besar sambungan las pelat yang digunakan.



Gambar 3: Benda uji sambungan las aluminium dengan penunjukkan titik-titik (area) yang mengalami noktah cacat (tanda panah)



Gambar 4 : Foto hasil uji radiografi dengan area/ titik yang akan dijadikan benda uji metallografy (kotak)

Area pengamatan analisis metallografy mempunyai ruangan yang sangat terbatas, maka sebelum material sambungan las diuji secara metallografy, terlebih dahulu dilakukan analisis dengan pengujian Radiografy untuk menentukan titik yang akan diuji secara mikroskopik agar pelaksanaan pengujian mencerminkan kondisi yang mengalami gangguan konstruksi paling kritis, yaitu seperti terlihat pada gambar 3 dan 4 dimana diperlihatkan titik / area yang dipotong untuk dijadikan benda uji metallografi. Analisis fraktografy dalam kasus ini digunakan untuk membuktikan secara visual gambaran kondisi struktur hasil pengelasan. Analisis fraktografy tersebut dilaksanakan dengan bantuan stereo microscope. Sementara itu, pelaksanaan pengujian, pengamatan dan analisis metallografy terhadap sambungan las aluminium yang digunakan adalah merupakan kegiatan kerekayasaan untuk lebih memastikan kondisi material secara mikroskopik sehingga diketahui kemampuan dan kekuatan material aluminium baik pada material dasar (base metal) maupun bagian pada material las (Weld Metal), serta bagian yang terkena efek panas akibat pengelasan (Heat Affected Zone).

Selanjutnya, sesuai dengan standar prinsip pengujian dan pemeriksaan metallografy, maka pelaksanaannya dapat dilakukan dalam 2 tahapan, yakni tahap 1: persiapan benda uji atau lebih dikenal dengan preparasi dan tahap 2: yaitu merupakan tahap pelaksanaan pengujian, serta pengamatan sampai pemilihan gambar struktur mikro yang dianggap benar-benar mewakili kondisi benda uji secara keseluruhan. Tahap 1 atau preparasi dilaksanakan mengacu kepada standar American Standard Test for Metal (ASTM) [8] tentang ”Metode Persiapan Benda Uji Metallografy”. Proses preparasi diawali dengan pengamatan visual untuk menentukan titik yang akan dilakukan proses pemeriksaan, kemudian dilakukan pemotongan dan pembentukan menggunakan alat potong yang tidak mempunyai efek panas dan gaya terhadap specimen uji. Lalu setelah berbentuk, benda uji dimounting kemudian dilakukan pengamplasan menggunakan kertas amplas (abrasive paper grinding) dari berbagai tingkat kekasaran kertas amplas dan pemolesan dengan pasta intan (diamond polishing) sampai permukaan benda uji tidak ada lagi unsur benda lain (termasuk debu) dan permukaannya dipastikan rata dan halus seperti permukaan kaca. Untuk memudahkan kedua proses tersebut benda uji di “mounting” terlebih dahulu. Selanjutnya, Tahap 2 adalah pelaksanaan pengujian dan pemeriksaan struktur mikro yang dilaksanakan mengacu kepada standar American Standard Test for Metal (ASTM) tentang ”Metode Pengujian mikroskopik (Metallografi) untuk logam dan paduannya”. Proses ini dimulai setelah permukaan benda uji selesai halus seperi kaca hasil preparasi sebelumnya. Langkah berikutnya adalah menentukan jenis etsa (etching) yang sesuai dengan material uji, dalam kegiatan ini menggunakan proses jenis etsa keller reagent. Proses etsa adalah membasahi permukaan uji dengan larutan tertentu dengan cara benda uji tersebut dicelupkan kedalam larutan atau diusap menggunakan media kapas yang dibasahi larutan etsa ke permukaan uji sehinga permukaan uji tersebut terlihat buram.

Kemudian, setelah permukaan benda uji berubah buram kembali, dimana hal ini menandakan bahwa proses etsa berjalan dengan baik, maka benda uji siap untuk diamati di bawah mikroskop, selanjutnya dipilih titik-titik yang dianggap mewakili kondisi benda uji secara keseluruhan. Biasanya gambar ditampilkan dalam bentuk mikroskopik dengan perbesaran antara 100 sampai dengan 500 kali sudah sesuai dengan kebutuhan. Selanjutnya dari pengujian ini dapat dilihat struktur mikro yang terkristalisasi, retak kecil dan inklusi pada benda uji.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan dapat diuraikan sebagai berikut, Setelah menentukan titik/ lokasi yang akan dianalisis maka untuk mendapatkan ukuran dan bentuk standar pengujian metallografy, area yang terindikasi ada cacat las dipotong melintang dan memotong panjang lasan agar terlihat secara keseluruhan bagian las dari sisi atas (*face band)* sampai sisi bawah (*root band*). Lokasi pengambilan dan arah benda uji yang dianalisis diperlihatkan pada gambar 5 dengan bentuk posisi yang dianalisis seperti terlihat pada gambar 6 dan 8.

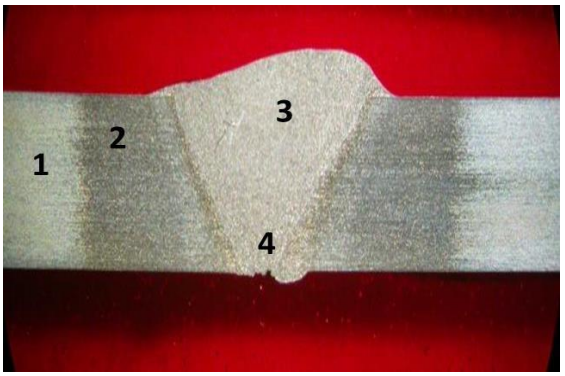
e-ISSN : 2621-5934
p-ISSN : 2621-7112

Gambar 5: Lokasi area untuk dijadikan benda uji metallografy (tanda garis merah = arah potongan pengamatan analisis metallografy).

Gambar 6: Benda uji yang dianalisis, dipotong sesuai tanda (garis merah pada gambar 5), photo makro dengan perbersaran 6 x, memperlihatkan bagian rootband, ada bagian yang kurang terisi oleh material las.

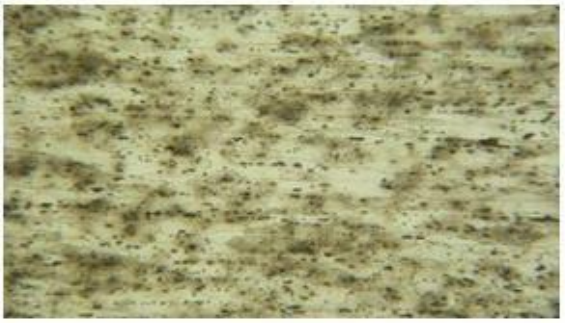
Gambar 6 memperlihatkan foto makro hasil analisis fraktografy yang mengklarifikasi hasil temuan radiografi (gambar 3 & 4) bahwa tampak adanya garis hitam diantara material dasar dan material las. Dari gambar 7 diperoleh informasi bahwa benda uji sambungan las mengalami kekurangan sempurnaan dengan adanya cacat las berupa *incomplete penetration* yang ditunjukkan oleh tanda panah pada gambar tersebut, padahal persyaratan umum pengelasan bahwa filler material las haruslah memenuhi/ sampai ke ujung *root band* (bagian bawah dari potongan melintang sambungan las) seperti terlihat pada gambar 7 tersebut.

Gambar 7 : Photo makro benda uji sambungan las detail pada daerah *rootband* dengan perbesaran 12x



Gambar 8: Lokasi titik pengamatan/ analisis metallograf

Gambar 8 menunjukkan titik-titik lokasi pemeriksaan analisis metallografy dari potongan melintang sambungan las yang sudah dibuat benda uji dan dipreparasi sampai dengan etsa, baik didaerah material dasar (BM), area terkena efek panas las (HAZ) dan material las (WM). Hasil dari pemeriksaan masing-masing titik tersebut diperlihatkan pada gambar 9, 10, 11, 12, 13 dan 14.

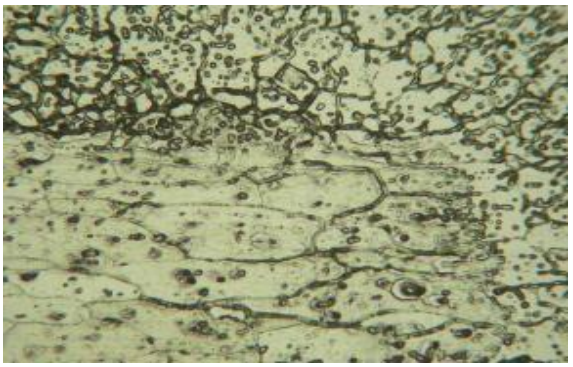


Gambar 9: struktur mikro lokasi 1 area material dasar (BM), perbesaran 100 x

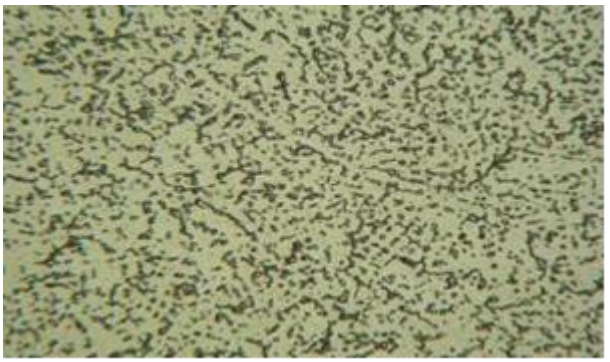
Gambar 10: struktur mikro lokasi 1 area material dasar (BM), perbesaran 200 x

e-ISSN : 2621-5934
p-ISSN : 2621-7112

Dari gambar 9 dan 10 dimana lokasi yang diamati merupakan bagian dari *Base Material* (BM) terlihat struktur mikronya berupa bentuk e*quaxial, dimana equaxial* ini adalah bentuk kristal logam yang halus hasil persenyawaan dengan perlakuan panas dari unsur kimia yang mempunyai perbedaan sifat geometris dan mekanis yang menonjol (biasanya terjadi pada paduan aluminium) misalnya Al dengan Si. Peristiwa ini berlangsung pada periode liquid menuju solid yang diperpanjang dengan proses *anealing* kemudian *normalising*. Hal ni untuk mendapatkan sifat mekanis yang lebih homogen mulai dari bagian luar sampai bagian dalam pelat, atau batang. Jika butirannya tidak halus dan merata antara bagian luar dan dalam akan terjadi *internal stress*, dan material akan rapuh. *Equaxial* dengan butiran yang memanjang ini berwarna hitam yang menunjukkan adanya unsur Mg_2S sesuai dengan karakteristik material aluminium Al 6065, disini tidak terdapat cacat apapun.



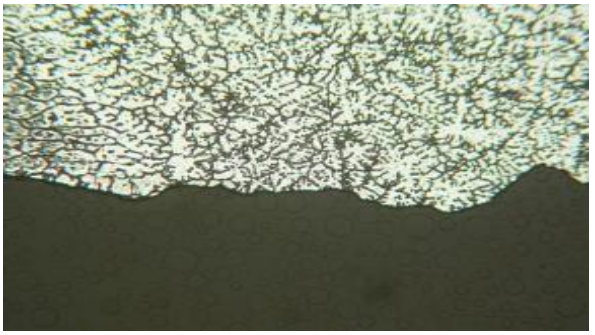
Gambar 11: struktur mikro lokasi 2 area terdampak efek panas (HAZ), perbesaran 100 x



Gambar 12: struktur mikro lokasi 3 area material las (WM) bagian atas (*faceband*), perbesaran 200

Kemudian dari gambar 11 dimana lokasi yang diamati tersebut berada di daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) struktur mikronya berupa *interdendritic*, dengan *fusion* yang baik serta tidak terlihat porositas dan cacat las lainnya.

Gambar 13: struktur mikro lokasi 4 area material las (WM)
bagian bawah (*rootband*), perbesaran 50 x



Gambar 14: struktur mikro lokasi 4 area material las (WM)
bagian bawah (*rootband*), perbesaran 100 x

Sementara itu bila diamati dari gambar 12 dimana lokasi yang diamati berada di daerah material las (*Welding Material*) yang di bagian atas (*faceband*) tampak struktur mikronya berupa *dendrite*, tidak terdapat porositas atau cacat las lainnya.

Berikutnya bila diamati dari gambar 13 dan 14 dimana lokasinya berada pada material las (*Welding Material*) juga tetapi yang ada di bagian bawah (*rootband*), tampak struktur mikronya berupa *dendrite*, terlihat adanya porositas yang mungkin dapat disebabkan oleh beberapa hal misalnya: elektroda yang lembab, adanya zat pengotor, adanya gas hidrogen, arus pengelasan terlalu rendah, dan sebagainya. Disamping itu pada bagian bawah pelat tersebut juga terdapat cacat las yang berupa *incomplete penetration* yang kemungkinannya akibat dari beberapa faktor seperti *travel speed* terlalu tinggi, jarak gap terlalu lebar, jarak elektroda terlampau tinggi atau sudut elektrodanya yang kurang tepat. [8].

Bila dilihat secara keseluruhan hasil lasan ini cukup baik, ada penyambungan yang merata dan dengan struktur mikro yang sama yaitu berupa struktur dendrite baik pada bagian yang dilas (*Base Material*), daerah yang terpengaruh panas (HAZ) maupun daerah logam lasan (*Welding Material*).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian pembahasan diatas maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut,

1) Dari pemeriksaan fraktografy dan metallografy dapat diketahui adanya cacat las berupa porositas dan penetrasi yang tidak sempurna didaerah bawah lasan. Hal ini lebih disebabkan karena proses pengelasan yang kurang tepat karena *filler metal* tidak sampai menyentuh ujung bawah lasan (*rootband*). Kemudian dari hasil pengamatan struktur mikro secara keseluruhan menunjukkan terjadinya penyambungan merata dengan struktur mikro dendrite di semua bagian baik di material dasar, daerah terdampak panas dan daerah maerial las.
2) Hasil penelitian ini sudah cukup untuk mengkonfirmasi hasil penelitian sebelumnya bahwa memang terdapat cacat didaerah bawah lasan berupa porositas dan penetrasi tidak sempurna yang dapat menjadi sumber resiko terjadinya retak awal. Oleh karena itu hasil penelitian ini dapat dipakai sebagai pertimbangan untuk perbaikan metode dan proses pengelasan guna mendapatkan sambungan las struktur kereta (*car body*) LRT yang lebih baik dan andal.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini kami sampaikan terima kasih kepada pimpinan B2TKS – BPPT yang telah memberikan kesempatan melakukan penelitian ini. Tak lupa kami sampaikan terima kasih kepada rekan- rekan B2TKS – BPPT yang telah banyak membantu dalam pelaksanaan penelitian. Juga, kami sampaikan terima kasih kepada rekan-rekan dari Universitas Pancasila atas kerjasamanya yang baik hingga dapat terselesaikannya makalah ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1]. Perpres RI, Nomor 98 Tahun 2015, Tentang Percepatan Penyelenggaraan Kereta Api Ringan/ Light Rapid Transit Terintegrasi di Wilayah Jakarta, Bogor, Depok, Bekasi, Jakarta, 2 September 2015 ;

[2]. D.Wong - Mc Sweeney et al, Human annoyance, acceptability and concern as responses to vibration from the construction of Light Rapid Transit lines in residential environments, Science of the Total Environment 568 (2016) 1308–1314, Elsevier, 2016;

[3]. Reliability, Availability, Maintainability, Safety (RAMS) and Life Cycle Costs (LCC), Committee on Technical Cooperation in the Development of the Rail Transport System / 11th July 2016

[4]. V. Vovka, *, R. Hoffmannb , A. Yasenc, Method of Welding and Spinning Combination for Complex Aluminium Alloys Lightweight Components, Published by Elsevier Ltd. Selection and peer-review under responsibility of the Conference Committee of Conference MEFORM 2015, Light Metals – Forming Technologies and Further Processing, 2014;

[5]. Soebagyo, Kusuma, Hernadi, Pemeriksaan Sambungan Las Aluminium Pada Struktur Kereta Api Ringan Dengan Metode Uji Tak Merusak, Jurnal Asiimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi, Jakarta, 2018;

[6]. ASTM E 340 – 15 (Standard Methods for Macro Etch of Metal Alloy Materials);

[7]. American Welding Society D.1.2 2012 (Standard Methods for Welding Test) 2012;

[8]. Kyle Williams, Aluminum Weld Discontinuities: Causes & Cures, ALCOA, Advancing Each Generation,