



PEMERIKSAAN SAMBUNGAN LAS ALUMINIUM PADA STRUKTUR KERETA API RINGAN DENGAN METODE *NON-DESTRUCTIVE TEST*

Examination of Connection of Aluminum Welding on Light Rapid Transit Structure using Non-Destructive Test Method

Hary Soebagyo^{1*}, Gilang Cempaka Kusuma², Hernadi²

¹Universitas Pancasila, Jagakarsa -Jakarta Selatan, Indonesia.

²B2TKS-BPPT, Puspiptek-Tangerang Selatan, Indonesia.

Informasi artikel

Diterima: 11/03/2019

Direvisi : 17/03/2019

Disetujui: 17/03/2019

Abstrak

Kereta Api Ringan (*LRT/ Light Rapid Transit*) merupakan salah satu angkutan massal yang efektif dalam mengatasi masalah transportasi di perkotaan. Kendaraan jenis ini akan digunakan secara luas untuk transportasi perkotaan nasional baik di Jawa maupun luar Jawa. Dalam rancang bangun struktur badan Kereta Api Ringan dari bahan aluminium banyak digunakan sambungan-sambungan las. Kualitas lasan dan kekuatan mekanik sambungan aluminium tersebut menjadi masalah ketika diminta jaminan kepastian keandalannya, karena untuk rancang bangun ini harus memperhatikan aspek "*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*" (RAMS). Oleh karena itulah guna verifikasi kualitas hasil pengelasan perlu dilakukan penelitian melalui serangkaian pemeriksaan pada daerah sambungan lasan yang beresiko mengalami kerusakan/ patah. Dalam penelitian ini dipilih metode uji tak merusak (*Non-Destructive Test*) guna pemeriksaan benda uji sambungan las aluminium yang akan digunakan pada struktur Kereta Api Ringan. Hasil pemeriksaan visual terlihat ada ketidaksesuaian pengelasan pada bagian *root pass* (tidak sesuai dengan tabel standar acuan). Sementara itu, hasil pemeriksaan radiography juga telah semakin memperjelas indikasi ketidaksesuaian tersebut. Dari hasil penelitian ini dapat diketahui adanya ketidaksempurnaan dari proses pengelasan yang dilakukan. Dengan demikian, penggunaan metode uji tak merusak dapat membantu koreksi secara tepat dan akurat terhadap ketidaksempurnaan hasil proses pengelasan dari sambungan las aluminium struktur kereta api ringan.

Kata Kunci: LRT, sambungan las aluminium, uji tidak merusak, inspeksi visual, radiography.

Abstract

Light Rapid Transit (LRT) is one of the effective mass transportations in overcoming transportation problems in urban areas. This type of vehicle will be used extensively for national urban transportation both on Java and outside Java. In the design of the structure of the railway body Lightweight aluminum material is widely used welding joints. The weld quality and mechanical strength of aluminum joints are a problem when asked for guaranteed reliability, because for this design must pay attention to the aspects of "Reliability, Availability, Maintainability and Safety" (RAMS). Therefore, to verify the quality of welding results it is necessary to do research through a series of inspections on the welded joint area which are at risk of being damaged / broken. In this research the Non-Destructive Test (NDT) method was chosen to examine the aluminum weld joint test specimens to be used in the LRT structure. The results of the visual inspection showed that there was a mismatch in the root pass section (not in accordance with the reference standard table). Meanwhile, the results of radiographic examinations have also further clarified the indication of the mismatch. From the results of this research it can be seen that there are imperfections of the welding process carried out. Thus, the use of non-destructive test methods can help correct and accurate correction of the imperfections of the welding process from light rail aluminum structure welded joints.

Keywords: LRT, aluminum welding connection, non-destructive test, visual inspection, radiography.

*Penulis Korespondensi: Tel: +6221 756 0930; Handphone: +62 812 922 1782
email : hary.soebagyo@univpancasila.ac.id

1. PENDAHULUAN

Transportasi publik atau transportasi massal dimaksudkan untuk mengangkut orang atau barang dari satu tempat ke tempat lain dengan menggunakan kendaraan tertentu yang memudahkan aktivitas pergerakan orang atau barang tersebut baik untuk kegiatan sosial ataupun ekonomi mereka. Berbagai moda transportasi telah digunakan baik untuk transportasi darat, laut maupun udara. Seiring dengan kebutuhan masyarakat, untuk moda transportasi darat dapat digunakan transportasi massal seperti bus ataupun kendaraan berbasis rel seperti kereta api, MRT (Mass Rapid Transit) dan LRT (Light Rapid Transit).

Transportasi telah memiliki peranan penting dan strategis guna mencapai tujuan-tujuan sosial ekonomi Nasional. Dalam konteks pembangunan Nasional, transportasi merupakan sarana untuk memperlancar roda perekonomian, memperkokoh persatuan dan kesatuan serta mempengaruhi hampir semua aspek kehidupan. Oleh karena itu, sarana dan prasarana transportasi Nasional perlu disiapkan dengan baik, aman dan nyaman.

Untuk transportasi massal, Pemerintah kini mendorong pengembangan transportasi darat berbasis rel yang merupakan bagian dari apa yang disebut sebagai kendaraan pengangkut massal (mass rapid transit), salah satunya adalah Kereta Api Ringan atau LRT (Light Rapid Transit), dimana istilah ini telah dituliskan dalam Lembar Negara RI (Perpres RI, 2015). LRT juga dipopulerkan dengan istilah lain yaitu Kalayang atau juga dapat diartikan sebagai kendaraan Lintas Rel Terpadu. Jenis kendaraan ini merupakan salah satu alat angkut massal seperti halnya Kereta Api Penumpang, beroperasi khusus di kawasan perkotaan, konstruksinya ringan dan kompak, serta dapat bersinergi bersama kendaraan lalu-lintas lainnya tanpa saling mengganggu karena menggunakan rel atau jalan khusus. LRT telah banyak digunakan diberbagai negara di Eropa, sementara di Asia Tenggara juga telah digunakan diantaranya di Filipina dan Singapura. Karakteristik atau spesifikasi LRT pada umumnya adalah:

- Mempunyai kapasitas angkut penumpang yang sesuai dengan kebutuhan warga perkotaan (Kapasitas angkut umumnya berkisar 10.000 hingga 30.000 penumpang per jam);
- Tampak seperti kereta api atau kereta rel yang terdiri dari beberapa

rangkaian kereta, namun dengan jumlah rangkaian yang relatif tidak banyak;

- Mempunyai banyak pintu untuk memudahkan keluar masuk penumpang; serta
- Konstruksinya relatif lebih ringan dibanding kereta api;
- Bergerak dengan kecepatan sedang (kurang lebih 30 Km/jam) dan efektif untuk pergerakan di wilayah perkotaan, serta aman dan nyaman dalam pengoperasiannya karena didukung oleh sarana operasi yang modern.

Kini LRT telah mengalami modernisasi, antara lain dengan otomatisasi, sehingga dapat dioperasikan tanpa masinis, dapat beroperasi pada lintasan khusus (*elevated rail*) baik diatas tanah (30 - 50 Cm) atau di jalan layang pada ketinggian tertentu 6 - 10 meter diatas tanah. LRT ini merupakan bagian dari *Mass Rapid Transit* (MRT) dengan cakupan wilayah yang lebih kecil dan merupakan bentuk armada yang lebih kompak dan ringan. Contoh kendaraan jenis LRT yang akan dioperasikan di Indonesia seperti ditunjukkan pada gambar 1 (hanya sebagai ilustrasi). Penggunaan LRT yang semakin banyak tidak menutup kemungkinan menimbulkan kebisingan lingkungan bagi warga perkotaan yang dilintasinya (D. Wong-McSweeney et al. 2016) dan perlu kebijakan dalam perencanaan tata kota.



Gambar 1 Contoh kendaraan jenis LRT (Nugroho, 2019)

Sementara itu, kedepan, tantangan umum dalam merancang sistem kereta api ringan ini adalah bagaimana mewujudkan potensi LRT dalam memberikan kecepatan yang lebih tinggi, memberikan kenyamanan layanan yang lebih baik lagi, ekonomis serta mudah dalam pengoperasian dan

perawatannya. Mengingat akan semakin banyaknya penggunaan bahan aluminium sebagai struktur LRT, serta adanya tuntutan akan keandalan dan keselamatan kendaraan yang memperhatikan aspek “*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*” (RAMS). RAMS ini sangat penting dan diperlukan untuk mengidentifikasi dan mengukur kegagalan peralatan, mesin atau sistem guna mencegah dan menghindari kerugian yang lebih besar (Francesco Corvaro et al, 2017). Untuk itu perlu dilakukan serangkaian penelitian eksperimental yang meliputi Uji Tak Merusak (NDT/ *Non Destructive Test*) maupun uji merusak (*Destructive Test*), serta dilengkapi pula dengan pemeriksaan fraktografi untuk mengetahui tipologi patahan yang terjadi.

Penelitian tentang sambungan las aluminium yang dikemukakan pada makalah ini dimaksudkan untuk menjelaskan salah satu fenomena hasil pemeriksaan yaitu ada atau tidak adanya cacat pada sambungan las aluminium. Hal ini cukup penting untuk dipahami karena pada sambungan las aluminium dapat terjadi adanya tegangan sisa yang sangat tinggi yang memunculkan resiko terjadinya retak. (V. Vovka et al, 2014). Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode pemeriksaan uji tak merusak (NDT). Hasil penelitian melalui pemeriksaan lasan sambungan aluminium ini akan dipakai sebagai dasar dari serangkaian pengujian merusak yang akan dilakukan seperti uji tarik, uji tekuk, maupun uji dampak pada sambungan las aluminium yang akan diterapkan pada struktur badan (*car body*) kereta api ringan.

2. METODOLOGI

Penelitian dilakukan secara eksperimental yaitu dengan melakukan pemeriksaan visual dan melakukan pengujian tak merusak (NDT) terhadap sampel sambungan las aluminium dari struktur badan Kereta Api Ringan. Kegiatan penelitian ini secara ringkas dapat digambarkan tahapannya dalam diagram alir seperti pada gambar 2. Setelah ditentukan metode penelitian berikutnya dilakukan persiapan Benda Uji dan dilanjutkan dengan pengujian atau pemeriksaan terhadap beberapa Benda Uji. Setelah diperoleh hasil, maka dilakukan analisis terhadap data dan fenomena yang terjadi. Selanjutnya dilakukan perumusan dan pengambilan kesimpulan dari hasil penelitian.

Pada penelitian ini telah dipilih dan ditetapkan pemeriksaan sambungan las aluminium dengan menggunakan pemeriksaan secara visual dan dipertegas dengan penggunaan metode radiography.



Gambar 2 Diagram alir kegiatan penelitian

Inspeksi visual dilakukan dengan melihat secara langsung benda uji lasan tersebut. Ini merupakan ketentuan dan persyaratan yang harus dilaksanakan dalam pemeriksaan sambungan las. Setiap benda uji sambungan las haruslah diperiksa secara visual terlebih dahulu dan memenuhi persyaratan dari *American Welding Society*.

Metode pemeriksaan berikutnya yang dipilih adalah metode radiography dengan merujuk pada standar American Society of Mechanical Engineering (ASME, 2015) dan American society of testing material (ASTM, 2010). Data perlakuan radiography dapat ditunjukkan pada tabel 2, dimana dari tabel ini disebutkan tentang penggunaan teknik penyinaran *Single wall single viewing*, sumber radiasinya menggunakan X - Ray, 90 kV - 1 mA, waktu expose 1 menit, waktu developingnya 5 detik, dan sebagainya.

Pengujian radiography adalah pengujian yang dilakukan tanpa merusak benda yang diuji, artinya tanpa merusak bahan baik dari segi fisik maupun reaksi kimia yang ada didalam benda tersebut. Secara teori, pengujian radiografi didedikasikan untuk mendapatkan gambar bayangan pada benda padat dengan menggunakan cahaya tembus radiasi yang dalam hal ini digunakan sinar X.

Tujuan dilakukan pengujian radiografi adalah untuk mendeteksi cacat pada permukaan benda uji ataupun didalam benda uji, mengukur geometri, serta menunjukkan penyatuan yang baik pada benda uji yang dalam hal ini berupa sambungan las aluminium.

Pengujian radiography termasuk dalam pengujian yang mempunyai sensitivitas tinggi. Cara kerja dari radiografi adalah menggunakan mesin pembangkit radiasi atau kamera yang didalamnya terdapat unsur radioaktif untuk memancarkan gelombang X ray / Y ray ke benda yang akan diuji, dimana gelombang tersebut kemudian akan menembus pada material yang diperiksa yang dibaliknya diletakan alat perekam (*film radiografi / Imaging plate*) yang berfungsi membentuk bayangan nyata yang selanjutnya akan dianalisis untuk mengetahui ketidaksempurnaan yang ada pada benda tersebut, gambar radiografi pada umumnya hanya terdiri dari warna hitam dan putih. Dimana pemeriksaan adanya cacat memanfaatkan prinsip dasar tingkat densitas (kecerahan) pada suatu area yang terlihat memiliki tingkat densitas yang tidak homogeny. Jika benda tersebut terdapat kecacatan maka hasilnya akan terlihat dengan sangat jelas. Berikut dapat disampaikan keuntungan dan kerugian penggunaan metode radiography, yaitu:

Keuntungan Radiography:

- 1) Persiapan pengujian yang mudah;
- 2) Dapat dilakukan pengujian untuk berbagai jenis material;
- 3) Dapat melihat kecacatan atau deformasi pada *surface* dan *sub surface*.

Kekurangan Radiography

- 1) Butuh tenaga ahli yang menjalankannya;
- 2) Peralatan yang mahal;
- 3) Terdapat resiko bahaya dari Radiasi.

Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan metode uji tak merusak (NDT). Seperti telah disebutkan diatas, metode pemeriksaan secara visual dan radiography digunakan dalam penelitian ini dalam rangka untuk mengetahui kemungkinan - kemungkinan terjadinya cacat lasan atau ketidaksempurnaan dari sambungan las Aluminium.

Bahan Aluminium dan sambungan las dalam penelitian ini adalah sebagaimana aslinya seperti yang digunakan pada

kendaraan LRT (*Light Rapid Transit*). Data Benda Uji sambungan las dapat ditunjukkan pada tabel 1, dimana dari tabel tersebut tampak spesifikasi dari benda uji yang berupa sambungan las plat Aluminium dengan kode material Al 6005 dan standar pengujian yang digunakan yaitu AWS D 1.2 2012.

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

Tabel 2 Perlakuan Radiography

ITEM	Keterangan
Teknik Penyinaran	Single wall single viewing
Sumber Radiasi	X - Ray, 90 kV - 1 mA
Penetrameter	ASTM 1B
Source of Film Distance	700 mm
Expose Time	1 Menit
Developing Time	5 Detik
Film Density	1.98 s/d 3.23
Sensitifitas	< 0,2

Tabel 2 memperlihatkan perlakuan radiography yang akan dilakukan. Untuk penelitian ini benda uji lasan tersebut diproses pengelasannya dengan metoda *Pulsed Gas Metal Arc Welding* yang menggunakan logam pengisi ER5356. Pelaksanaan pengujian tidak merusak ini mengacu kepada standar Amerika yaitu standar *American Welding Society* (AWS, 2015).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Inspeksi Visual

Dalam kegiatan penelitian ini telah dilakukan inspeksi visual terhadap beberapa benda uji sambungan las Aluminium. Seperti telah disebutkan diatas, inspeksi visual dilakukan dengan melihat secara langsung benda uji lasan tersebut. Setiap benda uji sambungan las telah diperiksa secara visual terlebih dahulu guna memenuhi persyaratan dari *American Welding Society*. Hasil inspeksi visual dapat dilihat pada gambar 3, 4, 5 dan 6. Dari pengamatan visual yang ditunjukkan pada gambar-gambar tersebut kemudian dibandingkan dengan “patokan” keberterimaan hasil inspeksi visual seperti yang ada pada tabel 3, yaitu *table acceptance test*. (AWS, 2015).



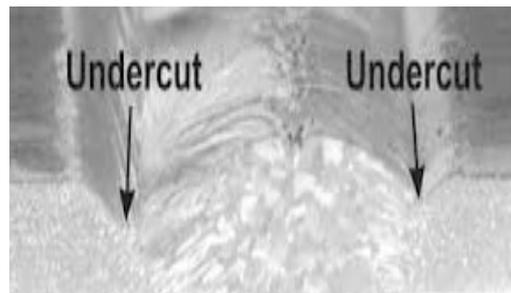
Gambar 3 Penerapan penetrasi penuh



Gambar 4 Tinggi lapisan penguat



Gambar 5 Cacat pengelasan akibat kurang penyatuan logam pengisi dengan logam induk



Gambar 6 Pengikisan sisi logam las

Tabel 3 *Visual Inspection Acceptance Criteria* (dimensions in inches [mm]) (AWS, 2015)

Issue	Statically Loaded Structures	Cyclically Loaded Structures
Cracks	None	None
Fusion between adjacent layers of weld metal and between weld metal and base metal	Required	Required
Groove weld maximum reinforcement		
$1 \leq 3/8$ [10]	3/32 [2]	3/32 [2.5]
$3/8[10] < t \leq 3/4$ [20]	1/8 [3]	1/8 [3]
$t > 3/4$ [20]	3/16 [5]	3/16 [5]
Groove welds maximum underfill	None	None
Undercut limits	For material ≤ 1 [25] thick, undercut $< 1/32$ [1] except undercut $< 1/16$ [2] for any cumulative length up to 2 [50] in 12 [300]. For material > 1 [25] thick, undercut $< 1/16$ [2].	No more than 0.01 [0.25] for welds Transverse to tensile stress; Otherwise no more than 1/32 [1]
Scratch or arc strike maximum depth	Same as undercut	Same as undercut
Surface porosity	Shall not exceed limits given in 5.15.1	Shall not exceed limits given in 5.15.2

Gambar 3 memperlihatkan dimana pada pengelasan benda uji telah diterapkan penetrasi penuh (*complete joint penetration*) dari satu sisi dengan bantuan *temporary backing plate*. Gambar 4 menunjukkan pemeriksaan visual dilakukan berikut dengan melakukan pengukuran tinggi lapisan penguat (*reinforcement layer / capping*) dan pemerataan penembusannya.

Sementara gambar 5 memperlihatkan adanya resiko cacat pengelasan yang menggunakan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW). Seringkali terjadi pengelasan terbentuk dengan penyatuan yang kurang sempurna dengan logam induk (*base metal*)nya. Pada gambar 6 ditunjukkan adanya resiko cacat pengelasan yang lain dari metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), yaitu adanya pengelasan yang menyebabkan terjadinya pengikisan pada sisi-sisi logam las.

Secara keseluruhan dari gambar-gambar tersebut dapat terbaca hal sebagai berikut:

- 1) Pengelasan dikategorikan sebagai *Completely Joint Penetration* yaitu dimana pengelasan dilakukan dari satu sisi dengan menggunakan *backing plate* temporer (AWS, 2015);
- 2) Ketinggian *Reinforcement layer* terukur tidak lebih dari 2 mm (tabel 3).

Pemeriksaan Sambungan Las dengan Radiography

Setelah pemeriksaan secara visual, maka pemeriksaan dilanjutkan dengan metoda radiography yang menggunakan sumber radiasi sinar - x dengan tegangan kerja 90.000 Volt dengan pemaparan selama 1 menit dimana teknik perekaman gambar digital digunakan untuk mendapatkan citra gambar yang optimal. Persyaratan keberterimaan dari pengelasan yang diperiksa telah ditentukan, yaitu harus terbebas dari adanya retak dan tidak melampaui persyaratan dari *American Welding Society*. Beberapa catatan untuk hasil radiography:

- 1) Indikasi cacat individu 2 mm atau lebih dengan catatan tidak lebih dari 2/3 ukuran las atau 20 mm dan tidak berada pada tepian dengan jarak 3 x ukuran indikasi terbesar;
- 2) Indikasi beberapa cacat yang terletak segaris dengan ukuran 2 mm atau lebih dengan catatan total panjang indikasi dikali 6 adalah tidak melebihi ukuran las atau jarak antara tiap indikasi kurang dari 3 kali ukuran indikasi terbesar;
- 3) Total panjang indikasi yang segaris dengan ukuran kurang dari 2 mm dalam setiap panjang 25,4 mm pengelasan tidak boleh lebih dari 10 mm. dimana indikasi yang diperhitungkan hanya indikasi dengan ukuran 1 mm atau lebih.

Dari kegiatan keseluruhan pengujian dengan NDT ini ada 2 catatan yang perlu diperhatikan, yaitu:

- 1) Hasil pemeriksaan visual diketahui adanya ketidaksesuaian pengelasan pada bagian *root pass*;
- 2) Dari hasil pemeriksaan radiography telah semakin memperjelas beberapa indikasi ketidaksesuaian pada sampel pengelasan yang memastikan bahwa pengelasan aluminium tersebut masih kurang sempurna.

Ketidaksempurnaan pengelasan yang terjadi pada daerah *root pass*, dapat saja diminimalkan dengan beberapa cara, yaitu:

- 1) Persiapan kampuh yang baik. Pemotongan dan pembuatan sudut kampuh yang baik memudahkan juru las untuk mendapatkan penembusan yang merata;
- 2) Pemeriksaan visual dilakukan segera setelah pengelasan selesai dilakukan dan apabila terlihat suatu ketidaksesuaian minor dapat langsung dilakukan tindakan perbaikan.

4. SIMPULAN

Analisis yang dilakukan diatas telah dapat menggambarkan bahwa pengelasan ini termasuk kategori *Completely Joint Penetration*, sementara itu dapat diketahui juga bahwa Ketinggian *Reinforcement Layer* terukur tidak lebih dari 2 mm. Kemudian dari proses pengelasan, hal yang perlu diperhatikan adalah bahwa hasil pemeriksaan radiography telah semakin memperjelas adanya indikasi ketidaksesuaian pada sampel pengelasan yang diperiksa.

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa benda uji sambungan las tersebut memang kurang sempurna cara pengelasannya, hasil pemeriksaan radiography juga telah menegaskan hal tersebut. Dengan demikian penggunaan metode uji tak merusak dapat membantu koreksi secara tepat dan akurat terhadap ketidaksempurnaan hasil proses pengelasan dari sambungan las aluminium struktur kereta api ringan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada pimpinan B2TKS - BPPT yang telah memberikan kesempatan kepada kami untuk melakukan kegiatan penelitian ini. Terima kasih juga kami sampaikan kepada rekan-rekan B2TKS - BPPT yang telah banyak membantu dalam pelaksanaan penelitian yang telah dilakukan. Tak lupa juga kami sampaikan terima kasih kepada rekan-rekan dari Universitas Pancasila atas kerjasamanya yang baik hingga dapat dituliskannya makalah ini.

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.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Testing Material (ASTM) E94-04. 2010. *Standard Guide For Radiographic Examination*.
- American Welding Society D.1.2. 2014 Clausul 5 (NDT), Clausul 2.4.4 (*visual inspection*), Clausul 5.15 (radiography).
- American society of Mechanical Engineering (ASME). 2015. section V nondestructive examination, article 2 *radiographic examination*,
- D.Wong - Mc Sweeney et al, 2016. 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 1308-1314, Elsevier, 2016.
- Francesco Corvaro Giancarlo Giacchetta, Barbara Marchetti, Maurilio Recanati, 2017. Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618, Southwest Petroleum University, *Production and hosting by Elsevier B.V. on behalf of KeAi Communications Co., Ltd*
- Jokowidodo, 2015, 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.
- Nugroho, I. S. 2019, Beroperasi Februari 2019, LRT Fase I Akan Terkoneksi dengan Trans Jakarta, <https://www.liputan6.com/bisnis/read/3862312/beroperasi-februari-2019-lrt-fase-i-akan-terkoneksi-dengan-trans-jakarta>. Diakses tanggal 12 Maret 2019.
- V. Vovka, R. Hoffmannb, A. Yasenc, 2014. Method of Welding and Spinning