

PENGARUH KARAT TERHADAP KETANGGUHAN MATERIAL BAJA UNTUK JEMBATAN

THE EFFECT OF RUSTING ON THE TOUGHNESS OF STEEL BRIDGE MATERIALS

Fauzri Fahimuddin^{1a*}, Mudiono Kasmuri^{2a}, Rikki Sofyan^{3a}

^aPoliteknik Negeri Jakarta, Jalan Prof.GA Siwabessy, Kampus UI, Depok 16425, Indonesia

e-mail: *fauzri.fahimuddin@sipil.pnj.ac.id , mudiono.kasmuri@sipil.pnj.ac.id, rikki.sofyan@sipil.pnj.ac.id

ABSTRACT

Rust is a major problem in steel bridge construction because it has the potential to affect the integrity of the structure and is also an important consideration for inspection and maintenance programs. However, there are no complete guidelines on the duration of rust in relation to the inspection and maintenance schedule. This study conducted a laboratory test on the effect of rust with a rusting time of 1 to 9 weeks on fracture toughness as one of the important mechanical properties of steel bridge elements. The specimens in this study were made of SM 490 type, steel commonly used for bridge construction. Rustless and rusted specimens were used with varying degrees of exposure after immersion in acid solution to simulate the rate of rust. The effect of rust rate on fracture toughness due to mass loss was studied. The fracture toughness of each specimen was monitored for those specimens with exposure periods of 1 week, 2 weeks, 3 weeks, 4 weeks, and 9 weeks to test their effect on toughness. The results of this study showed that there was no significant reduction in the rusting duration of 1 week, 2 weeks, 3 weeks, 4 weeks, and 9 weeks of fracture toughness. Rusting and testing activity for the long term is still ongoing and will be continued, as the results of this study greatly help bridge designers and asset managers to better model rust inspection and maintenance plans and assess the structural integrity of steel bridges affected by rust more accurately.

Keywords: *rusting, steel-bridge, fracture toughness.*

I. PENDAHULUAN

Karat atau korosi pada baja sangat erat hubungannya dengan inspeksi maupun perawatan, lebih khusus pada konstruksi jembatan baja karena konstruksinya yang terekspose secara terbuka di lingkungan yang tidak terlindung dari hujan serta panas. Pihak yang melakukan inspeksi maupun perawatan perlu dengan jelas mengetahui kapan, berapa lama, dan kondisi seperti apa karat atau korosi tersebut mulai menurunkan performa dari jembatan baja tersebut. Penelitian ini ditujukan untuk memenuhi tuntutan tersebut, agar dapat dijadikan pedoman serta menjaga agar jembatan baja selalu dalam kondisi prima.

Korosi pada baja sudah banyak diteliti karena merupakan masalah utama pada struktur, terutama jembatan baja, karena dapat menyebabkan berkurangnya penampang dan menurunkan sifat mekanik, termasuk kekuatan leleh, kekuatan ultimit, dan daktilitas [1], [2]. Penelitian-penelitian lain yang dilakukan terhadap baja untuk jembatan juga menyimpulkan hal yang sama. Penelitian-penelitian tersebut menyimpulkan

bahwa korosi dapat mengurangi masa layan jembatan dan membuat jembatan rentan terhadap kegagalan [3], [4]. Dalam sebagian besar kasus, baja jembatan secara bersamaan mengalami tegangan akibat pembebanan dalam kondisi mengalami korosi [5]. Oleh karena itu menjadi sangat penting untuk mempertimbangkan dan mengukur perilaku korosi serta dampaknya terhadap baja termasuk ketangguhan patahnya. Hal ini disebabkan oleh karena setiap konstruksi yang mengalami karat tersebut juga akan mengalami tegangan, kondisi seperti ini sangat terkait dengan upaya untuk mengoptimalkan pemeliharaan, perbaikan dan rehabilitasi jembatan baja selama umur rencana jembatan tersebut.

Tegangan yang bekerja pada struktur menyebabkan penurunan ketahanan baja yang terkorosi [6], [7],[8]. Proses korosi terhadap material baja juga cukup banyak diteliti, secara rinci, [9], [10], dan [11] menunjukkan bahwa film oksida pasif terbentuk sebelum dan selama korosi yang memberikan lapisan pelindung baja terhadap korosi. Disampaikan juga sebagai hasil

penelitiannya bahwa tegangan yang terjadi merusak film oksida pasif dan meningkatkan laju disolusi pada permukaan baja [11]. Selain itu, tegangan juga menyebabkan deformasi permukaan baja, yang meningkatkan energi permukaan dan memudahkan larutan korosif menutupi permukaan baja [7].

Interaksi tegangan dan korosi juga mengakibatkan penurunan sifat mekanik baja [9], [11]. Di satu sisi, seperti yang disebutkan sebelumnya, tegangan memainkan peran kunci dalam pecahnya film oksigen pasif dan inisiasi deformasi mikroplastik pada batas butir. Mereka berhubungan langsung dengan inisiasi dan propagasi retak korosi tegangan [10]. Di sisi lain, penggetasan hidrogen menjadi lebih serius ketika baja ditekan [9], [12]. Ini karena tegangan menyebabkan lebih banyak retakan dan rongga pada baja yang mendukung difusi dan tempat tinggal atom hidrogen.

Dalam sebagian besar kasus nyata, baja mengalami tegangan elastis (70% hingga 80% dari kekuatan luluh) di bawah beban layan [13], dan pengetahuan tentang pengaruh tegangan elastis terhadap korosi masih kurang. [7] dan [5] menunjukkan bahwa tegangan elastis dikaitkan dengan peningkatan energi permukaan, yang selanjutnya meningkatkan laju korosi baja. Namun, [8] menunjukkan bahwa penerapan tegangan elastis tidak berpengaruh pada laju korosi baja. Untuk menguji pandangan yang bertentangan ini, penelitian ini melakukan eksperimen komprehensif untuk menyelidiki pengaruh tegangan elastik pada laju korosi.

Selanjutnya, hasil studi menunjukkan bahwa baja yang mengalami tegangan lebih rentan terhadap retak korosi dengan tegangan dan embrittlement hidrogen [9], [14]. Selain itu, efek gabungan korosi dan tegangan pada sifat mekanik telah dipelajari terutama untuk baja pipa, tegangan tarik tinggi, dan baja tahan karat [15], [16], dan [17] seperti yang terjadi di [3] dan [18] hampir tidak ada penelitian yang relevan yang berfokus pada korosi baja di bawah tekanan dan lingkungan korosi yang terjadi secara bersamaan. Baja bagaimanapun, telah banyak digunakan termasuk untuk konstruksi jembatan [19].

Selain itu, menurut literatur, masuk akal untuk mengasumsikan bahwa lebih banyak atom hidrogen menembus baja ketika baja ditekan pada saat korosi. Namun, konsentrasi hidrogen antara baja stres dan non-tekanan belum dibandingkan di bawah lingkungan korosi yang sama dalam literatur sebelumnya.

Tulisan ini menyajikan program eksperimental yang komprehensif untuk mencapai tiga tujuan untuk menyelidiki pengaruh tegangan elastis pada

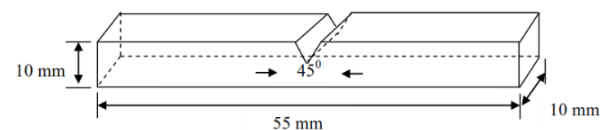
material baja tanpa korosi dan yang terkorosi dengan melakukan pengujian untuk mengukur degradasi sifat mekanik di bawah lingkungan tegangan dan korosi gabungan yang menimbulkan peningkatan konsentrasi hidrogen dan menimbulkan korosi pada material baja. Akibat korosi tersebut dilakukan penyelidikan dampaknya terhadap penurunan sifat mekanik material tersebut, yaitu ketangguhannya.

Baja jenis SM490 yang biasa dan banyak digunakan untuk konstruksi jembatan juga digunakan dalam penelitian ini. Simulasi uji korosi dilakukan dengan merendam spesimen baja dalam larutan asam. Kehilangan massa dan sifat mekanik spesimen setelah setiap tahap perendaman diukur.

II. METODE

A. Persiapan benda uji

Benda uji dibuat dari baja jenis SM490. Baja jenis ini biasa digunakan untuk konstruksi jembatan dan struktur baja umum lainnya. Semua benda uji dibuat sesuai dengan standar, yaitu ASTM E23 [20] dan [21] seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Benda Uji Charpy impact test [20]

Penelitian ini dilakukan di laboratorium Center of Technology Infrastruktur, Pusat Unggulan Teknologi Infrastruktur - Politeknik Negeri Jakarta atau PUTI-PNJ dengan menggunakan alat uji Charpy Impact Test ZBC2000 Model No. ZBC2752, Impact energy 750J.

Penelitian telah dilakukan dengan beberapa tahap. Disamping studi literatur juga dilakukan konsultasi serta diskusi dengan pihak industri seperti PT BUKAKA termasuk persiapan-persiapan dengan tim peneliti internal juga dengan pihak luar lainnya. Ada beberapa tahapan utama yang telah dilaksanakan, yaitu:

B. Membuat Benda Uji Impak

Pada proses pembuatan benda uji impak ini digunakan bahan baja dengan material grade JIS G3106 SM490 yang sangat banyak dan umum digunakan pada konstruksi jembatan baik di Indonesia maupun di negara lain. Ukuran masing-masing benda uji disesuaikan dengan ASTM E23 [20]. Proses pembuatan benda uji ini sendiri dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta menggunakan CNC 3-axis, MORI SEIKI MV-45/40, Jepang. Benda uji

yang telah selesai dibuat diperlihatkan seperti dalam Gambar 2.



Gambar 2. Benda Uji sebelum dikaratkan

C. Pengkaratan Benda Uji

Setelah membuat benda uji, selanjutnya dilakukan pengkaratan menggunakan campuran air suling dengan larutan Asam Sulfat (H_2SO_4) [22]. Sebelum berkarat benda uji ditimbang terlebih dahulu dan sebelum pengujian ditimbang kembali, hal ini dilakukan agar total kehilangan berat yang terjadi setelah proses pengkaratan diketahui [23], [24], dan [25]. Setelah itu pada saat campuran aquades dan H_2SO_4 yang sudah siap untuk benda uji dicelupkan ke dalam larutan campuran selama sehari, setelah seharian perendaman benda uji dikeluarkan dari campuran larutan dan ditempatkan dalam ruangan yang memiliki suhu ruangan kurang lebih $25^{\circ}C$ sehingga terjadi proses oksidasi sehingga benda uji menjadi berkarat [22]. Lamanya karat pada benda uji untuk uji impak dilakukan dalam lima variasi yaitu 1 minggu, 2 minggu, 3 minggu, 4 minggu, dan 9 minggu. Benda uji yang telah berkarat diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Benda Uji setelah dikaratkan

D. Pengujian

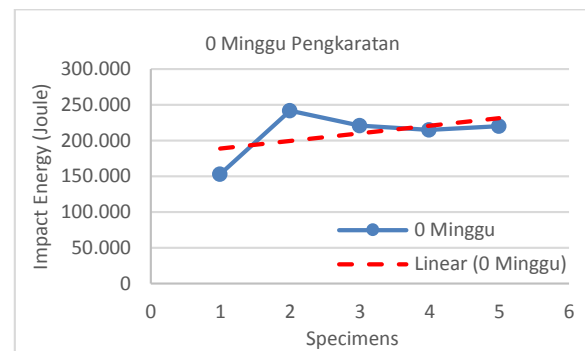
Pengujian impak untuk kesemua benda uji baik yang berkarat maupun yang tidak berkarat dilakukan di Laboratorium Pusat Unggulan Teknologi Infrastruktur – PUTI PNJ. Pengujian pertama dilakukan terhadap benda uji yang tidak berkarat. Kemudian setelah semua benda uji berkarat akibat perendaman dalam campuran

larutan H_2SO_4 dilanjutkan dengan melakukan pengujian sesuai dengan lamanya waktu pengkaratan terhadap setiap kelompok benda uji.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut adalah hasil uji impak yang telah dilakukan baik untuk benda uji yang berkarat maupun yang tidak berkarat.

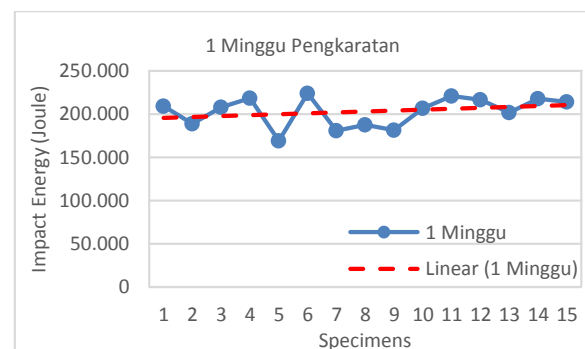
Benda uji yang tidak dikaratkan atau disebut 0 minggu pengkaratan langsung diuji impak. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa energi impak yang dihasilkan mempunyai kecenderungan yang dekat antara benda uji satu dengan yang lainnya, yaitu sekitar 200 joule.



Gambar 4. Hasil uji impak dengan pengkaratan 0 minggu

Benda uji dikaratkan secara bersamaan, kemudian dilakukan pengujian sesuai rencana yaitu untuk waktu pengkaratan 1 minggu, 2 minggu, 3 minggu, 4 minggu, dan 9 minggu.

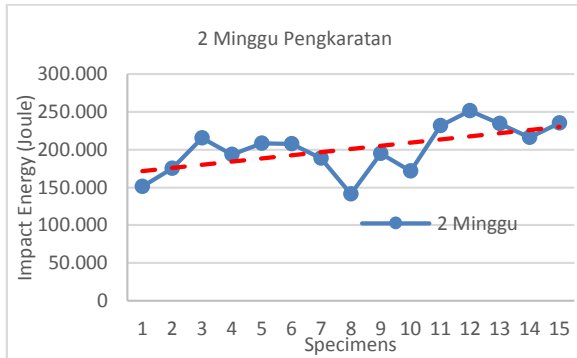
Sesuai dengan jadwal pengujian, benda uji yang telah dikaratkan selama 1 minggu pertama langsung diuji impak. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 5. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa energi impak yang dihasilkan mempunyai kecenderungan yang dekat antara benda uji satu dengan yang lainnya, yaitu sekitar 200 joule. Kecenderungan ini adalah sama dengan yang didapat dari benda uji tanpa dilakukan pengkaratan.



Gambar 5. Hasil uji impak dengan pengkaratan 1 minggu

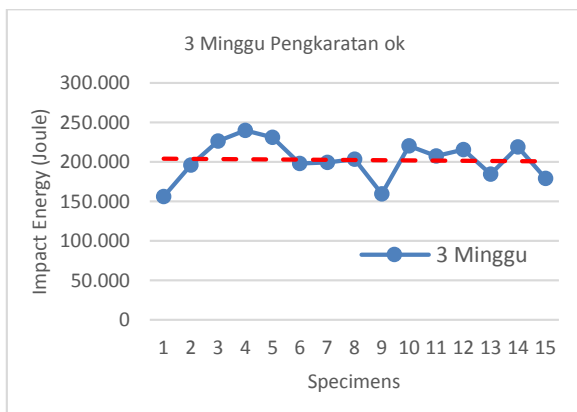
Pengujian selanjutnya dilakukan terhadap benda uji yang telah dikaratkan selama 2 minggu.

Hasil pengujian yang didapatkan ditunjukkan pada Gambar 6 dibawah ini. Data yang diperoleh dari semua benda uji ini menunjukkan hasil dengan energi impak juga mempunyai kecenderungan yang dekat antara benda uji satu dengan yang lainnya, yaitu masih berkisar 200 joule. Kecenderungan ini adalah sama juga dengan hasil yang didapat dari pengujian benda uji tanpa dilakukan pengkaratan.



Gambar 6. Hasil uji impak dengan pengkaratan 2 minggu

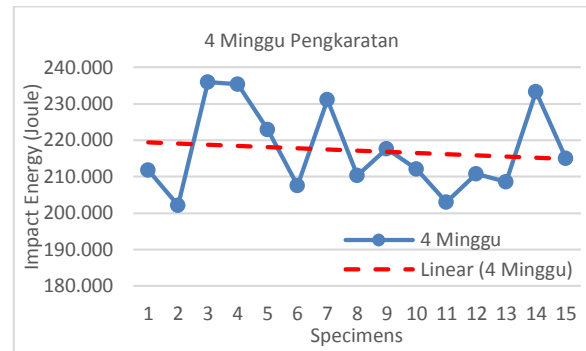
Pengujian berikutnya dilakukan dengan benda uji yang telah dikaratkan selama 3 minggu. Pengujian ini juga menunjukkan hasil pengujian yang sama dengan kecenderungan hasil yang didapat dari benda uji tanpa dilakukan pengkaratan, seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Data yang diperoleh dari benda uji ini menunjukkan hasil dengan energi impak yang dekat antara benda uji satu dengan yang lainnya, yaitu masih berkisar 200 joule.



Gambar 7. Hasil uji impak dengan pengkaratan 3 minggu

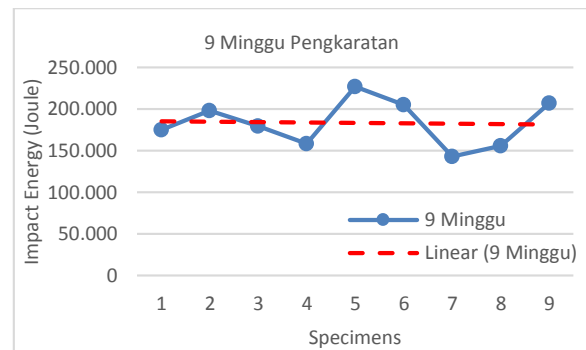
Pengujian diteruskan dengan benda uji yang telah dikaratkan selama 4 minggu. Seperti pengujian-pengujian sebelumnya, pada tahap ini ini juga menunjukkan hasil pengujian yang sama dengan kecenderungan hasil yang didapat dari pengujian terhadap benda uji tanpa dilakukan pengkaratan, seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Data yang diperoleh dari benda uji ini menunjukkan hasil dengan energi impak yang

dekat antara benda uji satu dengan yang lainnya, yaitu masih berkisar 200 joule.



Gambar 8. Hasil uji impak dengan pengkaratan 4 minggu

Pengujian selanjutnya dilakukan terhadap benda uji yang telah disiapkan dengan lama pengkaratan selama 9 minggu. Hasil yang didapatkan masih seperti pengujian-pengujian sebelumnya, yaitu pengujian terhadap benda uji tanpa pengkaratan maupun dengan pengkaratan 1 minggu, 2 minggu, 3 minggu, dan 4 minggu berturut-turut. Pada tahap ini juga menunjukkan hasil pengujian yang sama, seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Data yang diperoleh dari benda uji ini juga masih menunjukkan hasil dengan energi impak yang dekat antara benda uji satu dengan yang lainnya, yaitu masih berkisar 200 joule.



Gambar 9. Hasil uji impak dengan pengkaratan 9 minggu

IV. KESIMPULAN

Hasil pengujian dan analisa terhadap baja jembatan dengan benda uji yang non korosif maupun benda uji yang korosif menunjukkan bahwa tidak ada pengurangan signifikan dalam ketangguhan patah ketika baja telah berkarat hingga 9 minggu. Benda uji baja tanpa karat memiliki ketangguhan patah yang sama dengan benda uji baja yang berkarat. Hal ini menunjukkan bahwa baja berkarat dengan waktu pemaparan sampai dengan 9 minggu tidak menunjukkan kerentanan terhadap penggetasan hidrogen selama proses karat tersebut, belum terlihat penurunan ketangguhannya.

Pengujian dan studi jangka panjang masih berlangsung dan akan terus dilakukan, karena hasil ini sangat diperlukan dan membantu perancang jembatan serta pengelola aset seperti jembatan baja untuk dapat membuat model rencana inspeksi serta pemeliharaan terhadap korosi yang lebih baik. Hal ini diperlukan untuk dapat menilai integritas struktur jembatan baja yang terkena dampak korosi dengan lebih akurat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dukungan finansial dari Pemerintah Republik Indonesia melalui Unit Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat – Politeknik Negeri Jakarta dalam mendukung terlaksananya penelitian dan publikasi ini sangat kami hargai dengan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya. Terimakasih yang sebesar-besarnya juga kami sampaikan kepada pihak PT BUKAKA yang telah mendukung dalam pengadaan material untuk pengujian juga masukan-masukan berharga dalam mendukung penelitian ini. Semoga apa yang telah dan masih kami lakukan sekaitan dengan penelitian memberikan kontribusi dan manfaat kepada masyarakat, pemerintah, serta ilmu pengetahuan dan teknologi.

REFERENSI

- [1] Garbatov, Y., Soares, C. G., Parunov, J. & Kodvanj, J. Tensile strength assessment of corroded small-scale specimens. *Corrosion science* 85: 296-303, 2014.
- [2] Seica, M.V. & Packer, J.A, Mechanical properties and strength of aged cast iron water pipes, *Journal of materials in civil engineering* 16(1): 69-77, 2004.
- [3] Cheng, Y, Analysis of electrochemical hydrogen permeation through X-65 pipeline steel and its implications on pipeline stress corrosion cracking, *International Journal of Hydrogen Energy* 32(9): 1269-1276, 2007.
- [4] Li, L., & Mahmoodian, M. & Li C. Q., Structural assessment of an in-service steel viaduct using time variant reliability analysis, In 12th International Conference on Structural Safety and Reliability, At Technische Universität Wien, Vienna, Austria, 2017.
- [5] Wang, X., Tang, X., Wang, L., Wang, C. & Guo, Z., Corrosion behavior of X80 pipeline steel under coupling effect of stress and stray current, *Int. J. Electrochem, Sci* 9(8): 4574-4588, 2014.
- [6] Javaherdashti, R., Raman, R. S., Panter, C. & Pereloma, E, Microbiologically assisted stress corrosion cracking of carbon steel in mixed and pure cultures of sulfate reducing bacteria, *International biodeterioration & biodegradation* 58(1): 27-35, 2006.
- [7] Ren, R., Zhang, S., Pang, X. & Gao, K., A novel observation of the interaction between the macroelastic stress and electrochemical corrosion of low carbon steel in 3.5 wt % NaCl solution, *Electrochimica Acta* 85: 283-294, 2012.
- [8] Xu, L. & Cheng, Y., An experimental investigation of corrosion of X100 pipeline steel under uniaxial elastic stress in a near-neutral pH solution, *Corrosion Science* 59: 103-109, 2012.
- [9] Revie, R. W., *Corrosion and corrosion control*, John Wiley & Sons, 2008.
- [10] Li, M. & Cheng, Y., Corrosion of the stressed pipe steel in carbonate–bicarbonate solution studied by scanning localized electrochemical impedance spectroscopy, *Electrochimica Acta* 53(6): 2831-2836, 2008.
- [11] Liu, Y., Wang, Z. & Ke, W., Study on influence of native oxide and corrosion products on atmospheric corrosion of pure Al, *Corrosion Science* 80: 169-176, 2014.
- [12] Eggum, T. J., *Hydrogen in Low Carbon Steel: Diffusion, Effect on Tensile Properties, and an Examination of Hydrogen’s Role in the Initiation of Stress Corrosion Cracking in a Failed Pipeline*. University of Calgary, 2013.
- [13] *Design loads, Bridge design, Part 2*, Australia Standards AS 5100.2, 2017.
- [14] Marcus, P., *Corrosion mechanisms in theory and practice*, Crc Press, 2011.
- [15] Li, C. Q. & Mahmoodian, M, Risk Based Service Life Prediction of Underground Cast Iron Pipes Subjected to Corrosion, *Journal of Reliability Engineering & System Safety* 119: 102-108, 2013.
- [16] Mahmoodian, M. & Li, C. Q., Reliability based service life prediction of corrosion affected cast iron pipes considering multi failure modes, *ASCE Journal of Infrastructure systems*, 2017.
- [17] Mahmoodian, M. & Li, C. Q., Stochastic service life prediction and reliability analysis of defected steel pipes, *Journal of Petroleum science and engineering* 151: 434438, 2017.
- [18] Liu, Z., Li, X., Du, C., Zhai, G. & Cheng, Y, Stress corrosion cracking behaviour of X70 pipe steel in an acidic soil environment, *Corrosion Science* 50(8): 2251-2257, 2008.
- [19] Yakel, A. J. & Azizinamini, A., Improved moment strength prediction of composite steel plate girders in positive bending, *Journal of bridge engineering* 10(1): 2838, 2005.

- [20] Standard Test, Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM E 23-02, 2002.
- [21] Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- [22] Standard Practice for Laboratory Immersion, ASTM G31-72. 2004.
- [23] Corrosion Testing of Metals. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- [24] Standard Test Method for Electrochemical, ASTM F1113-87. 2017.
- [25] Measurement of Diffusible Hydrogen in Steels (Barnacle Electrode). ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org