

Evaluasi Sisa Kekuatan Korosi Pelat Baja yang Mengalami Beban Tekuk

Lusman Sulaiman

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andi Djemma, Jl. Tandipau No.5 Palopo
E-mail: lusman.sulaiman@ftunanda.ac.id

Tatsuya Yokogawa

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University
10-13 Dogo-Himata, Ehime, Japan, E-mail: yokogawa@cee.ehime-u.ac.jp

Seiji Furukawa

West Nippon Expressway Engineering Shikoku Compony Limited, Japan
E-mail: seiji.furukawa@w-e-shikoku.ac.jp

Mitao Ohga

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University
10-13 Dogo-Himata, Ehime, Japan, E-mail: ohga@cee.ehime-u.ac.jp

Pang-jo Chun

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University
10-13 Dogo-Himata, Ehime, Japan, E-mail: chun.pang-jo.mj@ehime-u.ac.jp

Abstrak

Korosi elemen-elemen struktur jembatan baja karena terekspose ke lingkungan menjadi salah satu masalah serius di seluruh dunia hari ini. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi sisa kapasitas kekuatan korosi pelat baja yang terlihat pada bagian struktur jembatan baja yang mengalami beban tekuk dengan analisis eksperimen laboratorium dan komputasi. Spesimen uji diperoleh dari potongan gelagar jembatan yang telah mengalami korosi karena adanya reaksi kimia dengan lingkungan sekitarnya selama bertahun-tahun dan mereduksi ketebalannya serta membentuk permukaannya menjadi ireguler. Kemudian dibentuk sesuai standar spesimen pengujian Japanese Industrial Standard (JIS No.5, 1995). Sistem scanning 2D juga telah dilakukan pada spesimen uji dengan tujuan memperoleh data grid sumbu x dan y dalam membentuk Finite Elemen Models (FEM). Hasil pengujian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa korosi yang terjadi pada pelat baja dapat menurunkan kemampuannya dalam memikul beban tekuk. Juga dipelajari efek dari beberapa parameter yaitu tebal minimum pelat (t_{min}), permukaan ireguler pelat dan eksentrisitasnya terhadap perilaku tekuk korosi pelat baja. Kemudian, suatu rumusan baru dibuat yang dapat dipergunakan dalam menentukan dan mengevaluasi sisa kekuatan tekuk korosi pelat baja baik tanpa maupun dengan adanya pengaruh eksentrisitasnya.

Kata-kata Kunci: Korosi pelat baja, permukaan ireguler, beban tekuk, metode eksperimen, FEA.

Abstract

Corrosion of structural steel bridge elements due to eksposed to the environment becomes a serious problem in the world today. Therefore, the aim of this research is to evaluate the residual strength of corroded steel plates which are seen in the steel bridge structure elements under buckling load by experimental laboratory and computational analyses. Specimen tests are obtained from a part of the girder bridge that has been corroded due to chemical reactions with it's around environment for years and reduced its thickness through become the irregular surfaces. They were then fabricated based on standard of test specimen of Japanese Industrial Standard (JIS No.5, 1995). 2D scanning system was conducted to specimen test in order to obtain the grid data x and y coordinates to form Finite Element Model (FEM). The test results reveal that corrosion on steel plates is able to reduce the bearing capacity under buckling load. Also effect of some parameter studies such as minimum thickness (t_{min}), irregular surfaces and the amount of eccentricity to buckling behavior of corroded steel plates was studied here. Then, a new proposal formula is developed that able to be used for deciding and evaluating the residual buckling load of corroded steel plates with or without the effect of an amount of eccentricity.

Keywords: Corroded steel plate, irregular surface, buckling load, experimental method, FEA.

1. Pendahuluan

Pada umumnya, penyebab utama kerusakan pada struktur jembatan baja adalah korosi dan *fatigue* sehingga

menghasilkan penurunan kapasitas daya dukung dan kinerja struktur jembatan baja (Kayser and Nowak, 1989). Sehingga tingkat kerusakan menjadi tidak tentu serta keselamatan dan kenyamanan belum cukup sebagai

syarat manajemen infrastruktur jembatan (Sarveswaran, *et al.*, 1998; Sharifi, *et al.*, 2011). Oleh karenanya diperlukan dan dibuat suatu sistem manajemen infrastruktur jembatan secara praktis seperti bukan hanya mengevaluasi performanya dan dapat memprediksi kerusakan elemen-elemen jembatan namun juga merencanakan suatu metodologi perbaikan yang mengacu pada biaya minimum dengan kualitas maksimal (Miyamoto, *et al.*, 2001; Ahn, *et al.*, 2013). Jadi, penelitian ini dibangun dengan metode pendekatan secara eksperimen laboratorium dan komputerisasi untuk mengevaluasi sifat dan sisa kekuatan aktual korosi jembatan baja yang telah digunakan selama bertahun-tahun untuk dapat menentukan strategi perbaikan yang tepat.

Kekuatan *ultimate* pelat baja dalam menahan beban sangat dipengaruhi oleh ketahannya terhadap korosi. Korosi menimbulkan adanya permukaan material baja menjadi korosi global atau lokal hingga mereduksi materialnya (Roberge, 2008; Xie and Huang, 2016). Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik korosi pelat baja yang mengalami beban tekan secara analisis eksperimen dan numerik. Paik, *et al.* (2003) menganalisis karakteristik kekuatan *ultimate* tekuk elemen pelat dengan korosi global dan lokal dibawah beban aksial tekan. Mereka membentuk spesimen uji dengan tingkat intensitas korosi dan aspek rasio pelat berbeda-beda. Hasil analisis eksperimen dan numerik memperlihatkan bahwa kekuatan *ultimate* berkurang signifikan karena disebabkan korosi global maupun lokal serta luas penampang pelat. Beaulieu, *et al.* (2010) melakukan percobaan kuat tekan pada pelat baja siku dengan proses korosi buatan secara eksperimen laboratorium. Rahbar-Ranji (2012) menggunakan pendekatan *nonlinear Finite Element Analysis* (FEA) dengan bantuan *power spectrum* untuk mengestimasi kekuatan *ultimate* korosi pelat dengan permukaan ireguler dibawah beban tekan. Ok, *et al.* (2007) telah menginvestigasi lebih dari 256 *nonlinear finite element analyses* menggunakan *Softwer ANSYS SHELL181* pada pelat dengan berbagai variasi pada letak dan ukuran korosi. Hasil analisis memperlihatkan bahwa pengaruh panjang, lebar dan tebal *pit* korosi (Nakai, *et al.*, 2006) telah melemahkan kekuatan *ultimate* pelat. Silva, *et al.* (2013) menganalisis sebanyak 3575 korosi pelat untuk mengetahui sisa kekuatan *ultimate*-nya. Untuk membentuk geometri permukaan pelat dengan tingkat korosi yang berbeda, Simulasi *Monte Carlo* dan *Nonlinear FEA* diadopsi.

Sifat mekanik korosi baja telah banyak dipelajari, namun penelitian masih kurang dilakukan pada pelat baja dibawah pengaruh beban tekuk. Terbentuknya korosi masih sebatas buatan, belum menggambarkan korosi yang terbentuk secara alamiah di lingkungan. Karena *Finite Element Method* (FEM) merupakan salah satu metode terpercaya dan dapat dipergunakan untuk mengevaluasi sisa kekuatan pelat baja baik korosi global maupun lokal (Jiang and Soares, 2011 dan 2012) dengan hasil memuaskan dan dengan bantuan komersial *softwer Abaqus/Standar* dan eksperimen laboratorium sebagai validasi FEM, penelitian ini dilakukan.

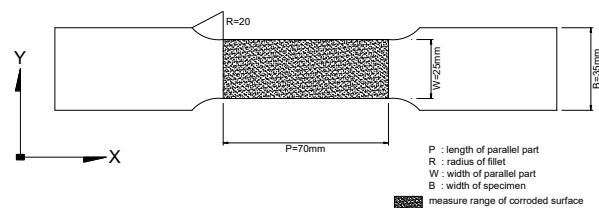
2. Analisis Eksperimen

2.1 Konfigurasi spesimen uji

Spesimen uji pada penelitian ini diperoleh dari gelagar baja Jembatan Amarube yang terletak di Prefektur Hyogo, Jepang dan telah digunakan selama 98 tahun. Sembilan spesimen uji (AF1-AF9) yang telah mengalami korosi dibentuk sebagai spesimen uji dan dianalisis sisa kekuatannya. Sebelum melakukan pengukuran dimensi, karat dan cat yang masih melekat pada kedua permukaan pelat dihilangkan dan dibersihkan secara hati-hati dengan menggunakan sikat kawat listrik dan palu. Kemudian, dua potongan pelat baja SM490A dengan lubang baut disambung dan dilas pada kedua ujung spesimen yang berfungsi sebagai tempat cengkraman mesin kompresi seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**. Selain itu, tiga sampel pelat baja (FM1-FM3) yang tidak berkorosi sesuai dimensi JIS No.5 seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**, diuji untuk memperjelas dan mengetahui karakteristik material spesimen dan hasil pengujian dibandingkan dengan spesimen SS400JIS yang dapat dilihat pada **Tabel 1**. Di sini, lebar spesimen berkisar antara 75mm – 88mm. Kemudian, spesimen uji dengan permukaan ireguler tersebut diukur dengan menggunakan *2D laser displacement sensor*.



Gambar 1. Korosi spesimen dengan permukaan ireguler



Gambar 2. Sampel uji JIS no. 5

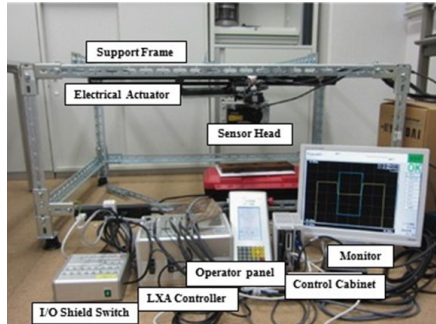
2.2 Pengukuran ketebalan pelat

Akurasi, mudah digunakan, mudah dipindahkan dan ringan adalah keunggulan yang diperlukan dari seperangkat alat ukur untuk pengukuran permukaan ireguler korosi spesimen di lapangan. Oleh karena itu, sistem pengukuran dengan menggunakan alat *2D laser displacement sensor* dipilih sebagai pengukuran dimensi spesimen uji pada penelitian ini dan dikombinasikan dengan *head sensor* serta perangkat aktuator listrik seperti pada **Gambar 3**. Dari seperangkat alat tersebut, data terukur diperoleh. ketebalan spesimen uji kemudian ditentukan dengan interval 2 mm dengan menggunakan **Persamaan 1** sebagai berikut:

$$t_1 = \Delta h_1' + t_a - \Delta h_1 \quad (1)$$

dimana $\Delta h_1'$ dan Δh_1 adalah jarak antara setiap titik

dengan pelat referensi masing-masing dan t_a adalah tebal pelat referensi yang telah ditentukan seperti pada **Gambar 4**. **Tabel 2** merangkum hasil pengukuran tebal rata-rata pelat t_{avg} , tebal minimum pelat t_{min} , tebal maksimum pelat t_{max} , dan tebal rata-rata pertengahan pelat t_{cavg} .



(a)



(b)

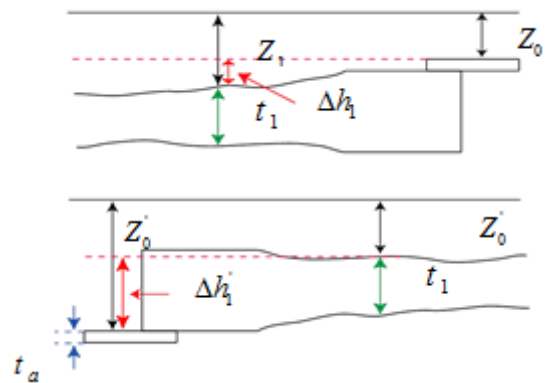
Gambar 3. (a) Instrumen alat pengukur, (b) Situasi pengukuran permukaan spesimen uji

Tabel 1. Material properties spesimen uji

Spesimen	Modulus Elastisitas (Gpa)	Poisson's ratio	Tegangan leleh (MPa)	Kekuatan tarik (MPa)	Elongasi setelah putus (%)
FM1	203,3	0,287	257,85	383,36	41,4
FM2	199,3	0,283	281,06	386,4	38,52
FM3	200,3	0,282	269,09	390,59	39,23
SS400 JIS	200	0,3	245~	400~510	21~

Tabel 2. Hasil pengukuran tebal pelat spesimen uji

Spesimen	Tebal rata - rata pelat t_{avg} (mm)	Tebal minimum pelat t_{min} (mm)	Tebal maksimum pelat t_{max} (mm)	Tebal rata - rata minimum pelat t_{mavg} (mm)	Tebal rata - rata pertengahan pelat t_{cavg} (mm)
AFM1	14,788	11,175	15,9	13,697	15,4
AFM2	11,084	7,426	15,217	9,603	11,544
AFM3	10,164	5,242	14,407	9,122	10,171
AFM4	13,732	8,626	15,9	12,552	13,028
AFM5	14,544	9,347	15,9	13,047	14,711
AFM6	14,61	10,707	15,9	13,629	14,512
AFM7	13,994	10,078	15,9	11,147	14,209
AFM8	12,737	8,465	15,9	10,704	13,678
AFM9	15,399	11,127	15,9	14,617	15,542



Gambar 4. Perhitungan tebal pelat spesimen uji

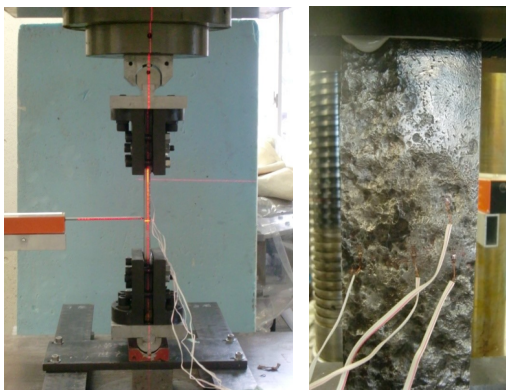
2.3 Set up alat uji

Kapasitas mesin kompresi yang digunakan pada penelitian ini adalah 2940 kN seperti pada **Gambar 5**. Pengujian tekuk dilakukan dengan mengendalikan kecepatan beban dimana spesimen uji dengan korosi ringan sebesar 0,15 kN/detik, dan 0,05 kN/detik untuk korosi parah dengan interval data akuisisi sebesar 1 detik, yang dimaksudkan untuk menghindari kegagalan dinamis pada spesimen uji. Pemasangan spesimen uji dilakukan secara hati-hati dengan bantuan *laser levels* yang merupakan sebuah alat pengontrol terdiri dari sebuah *laser beam projector*. Alat tersebut dipasang pada sebuah *tripod*, yang diratakan berdasarkan akurasi alat dan memproyeksikan garis merah atau hijau sepanjang sumbu horisontal dan vertical ke spesimen uji. Sehingga spesimen uji dapat terpasang tegak dan lurus serta terletak presisi pada tengah alat uji tekan.

Aparatur yang melekat pada kedua ujung spesimen uji adalah perletakan sendi yang dimaksudkan agar kedua ujungnya dapat memutar secara bebas ketika diberikan beban tekan seperti terlihat pada **Gambar 6**. Kemudian dipasang satu titik *strain gauge* pada bagian tebal minimum dan tiga titik pada pertengahan spesimen uji yang dipasang secara paralel terhadap beban axial. Hal tersebut dimaksudkan agar dapat mengetahui pengaruh tebal minimum pelat terhadap beban axial yang bekerja. Informasi yang diperoleh dari hasil pengujian akan dikalkulasi secara komputerisasi sehingga dapat diperoleh hasil maksimal dan akurat.



Gambar 5. Alat penguji



Gambar 6. Set up spesimen uji

2.4 Hasil dan pembahasan analisis eksperimen

Pada umumnya, perhitungan beban tekuk *Euler* P_{cr} dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 2** dimana E adalah modulus elastisitas, I adalah momen inersia, k adalah faktor panjang efektif yang tergantung pada ujung tumpuan spesimen uji, dan L adalah panjang spesimen uji. Rumus tersebut juga digunakan sebagai metode analisis sederhana. Namun, sejak rumus beban tekuk *Euler* tidak sesuai untuk fenomena tekuk dan perilaku spesimen korosi baja, yang merupakan metode analisis sederhana. Sehingga hal tersebut hanya digunakan sebagai perhitungan acuan dasar untuk mendapatkan sisa kekuatan tekuk dari korosi pelat baja yang disajikan dalam penelitian ini.

$$P_{cr} = \frac{k\pi^2 EI}{L^2} \quad (2)$$

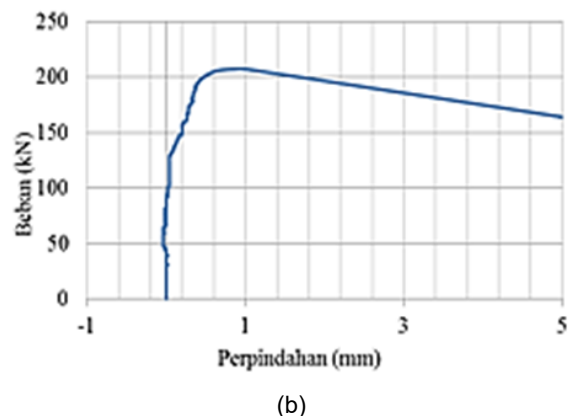
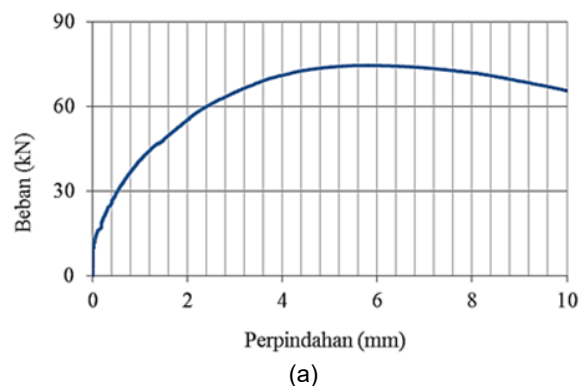
Tabel 3 menunjukkan hasil kuat tekuk yang berasal dari percobaan eksperimen, perhitungan beban tekuk *Euler*, panjang tekuk efektif dan sifat tekuk. Juga dari hasil analisis eksperimen mengungkapkan bahwa kuat tekuk rata-rata benda uji lebih rendah dari kuat tekuk *Euler*. Hal tersebut dikarenakan terjadi reduksi luas potongan melintang spesimen uji hingga terjadi permukaan ireguler pelat baja yang berakibat berkurangnya kapasitas kekuatannya dalam menahan beban tekuk.

Lebih lanjut, contoh spesimen uji untuk diselidiki adalah AF4 dan AF9, dimana terlihat bahwa tebal minimum (t_{min}) AF4 lebih besar dari AF9 (**Tabel 2**). Sehingga, hasil pengujian secara eksperimen dari hubungan beban-perpindahan kedua spesimen uji ini dapat diperlihatkan masing-masing pada **Gambar 7(a)** dan **(b)**. Ditemukan bahwa beban maksimum AF9 jauh lebih tinggi dari AF4 karena tebal minimum korosi pelat baja (t_{min}) mempengaruhi beban tekuk sangat besar. Selain hal tersebut, akibat adanya reduksi luas potongan melintang spesimen uji maka sifat tekuk akan terjadi yaitu AF4 mengalami tekuk lokal dan AF9 tekuk total seperti hasil analisis eksperimen pada **Tabel 3**.

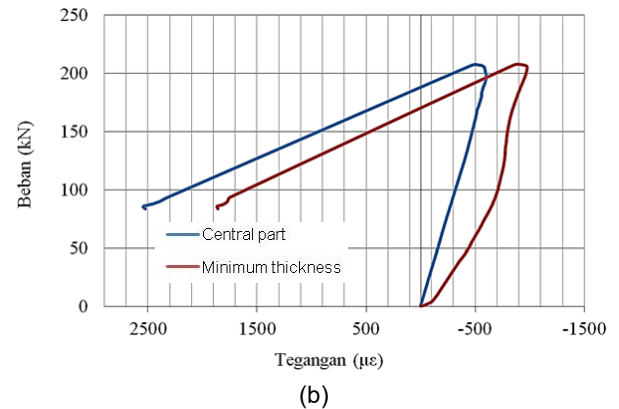
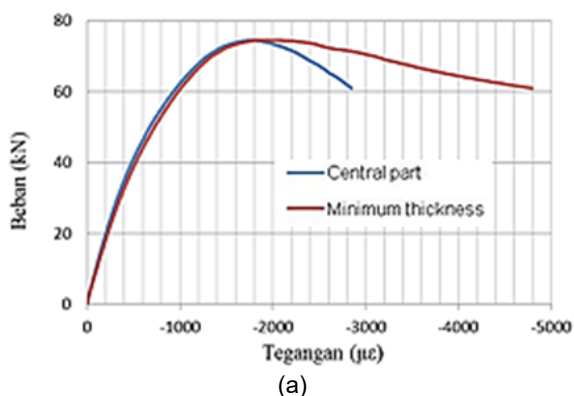
Tabel 3. Beban tekuk, beban tekuk *Euler*, panjang tekuk efektif dan jenis tekuk

Spesimen	Beban Tekuk (kN)	Beban Tekuk Euler (kN)	Lebar (mm)	Panjang Efektif Tekuk (mm)	Jenin Tekuk
AFM1	81.6	129.7	78.0	636	Tekuk total
AFM2	43.3	149.7	87.8	628	Tekuk total
AFM3	41.3	121.6	74.9	646	Tekuk total
AFM4	74.6	132.7	81.9	644	Tekuk total
AFM5	60.6	117	85.8	702	Tekuk total
AFM6	92.8	140	88.0	650	Tekuk total
AFM7	60.7	141.2	85.5	650	Tekuk total
AFM8	79.7	132.7	81.9	638	Tekuk total
AFM9	207.1	138.4	83.8	644	Tekuk total

Pengaruh pusat tegangan pada permukaan korosi pelat baja dari hasil pengukuran *strain gauge* diperhitungkan pada penelitian ini. Investigasi hubungan beban-tegangan pada spesimen uji AF4 dan AF9 dapat ditunjukkan pada masing-masing **Gambar 8(a)** dan **(b)** dan diasumsikan bahwa tegangan yang mengalami tarik akan bernilai positif dan tegangan yang mengalami tekan akan bernilai negatif. Dari hasil analisis terlihat bahwa nilai beban tekuk ultimate pada central part dan tebal minimum korosi pelat baja hanya memiliki perbedaan nilai yang sangat kecil. Selain itu, **Gambar 8(a)** mengungkapkan bahwa tegangan pada bagian spesimen uji dengan tebal minimum adalah jauh lebih besar daripada di bagian lain ketika tekuk lokal terjadi. Sebaliknya, **Gambar 8(b)**, mengungkapkan bahwa kurva strain pada bagian spesimen uji dengan tebal minimum terlihat mirip dengan bagian lain ketika tekuk total terjadi.



Gambar 7. Perbandingan beban-perpindahan untuk kurva (a) spesimen uji AF4 (b) spesimen uji AF9



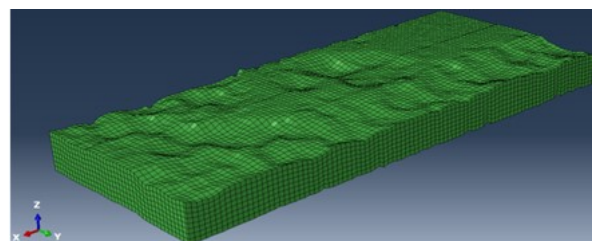
Gambar 8. Hubungan beban-tegangan (a) AF4 tekuk lokal (b) AF9 tekuk total

3. Analisis Numerik

3.1 Finite element model

3D finite element analysis pada korosi pelat baja dijalankan dengan menggunakan komersial program Abaqus/Standard. Selanjutnya, *Continuum Three-dimensional solid element* dengan *hexahedral nodal points* (C3D8R) dan *Updated Riks Method* berdasarkan *incremental theory* sebagai suatu kontrol analitik diadopsi pada penelitian ini. Kemudian *nonlinear elastic-plastic material* dan *von Mises yield criterion* diasumsi untuk *material properties*. Model analisis AF1 dengan dimensi panjang (X), tebal (Y) dan lebar (Z) dibentuk sesuai kondisi korosi sebenarnya dengan interval 2mm *grid mesh* dan diterapkan pada semua model analisis (AF1-AF9).

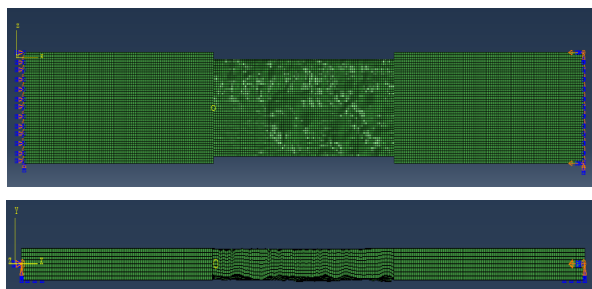
Gambar 9 memperlihatkan tampilan *isometric FEM model* korosi pelat baja dengan jumlah *nodes* sebanyak 29,760. Jumlah *nodes* ini akan berubah-ubah untuk setiap spesimen uji korosi pelat baja. *Yield stress* $\sigma_y=257.85$ [MPa], *Elastic modulus* $E=200.3$ [GPa] dan *Poisson's ratio* $\nu=0.287$, digunakan pada semua analisis model FEM. Data tersebut diperoleh dari hasil pengujian laboratorium (**Tabel 1**) dan dipilih oleh karena lebih mendekati nilai spesimen SS400.



Gambar 9. Tampilan *isometric FEM* AF4

3.2 Boundary condition

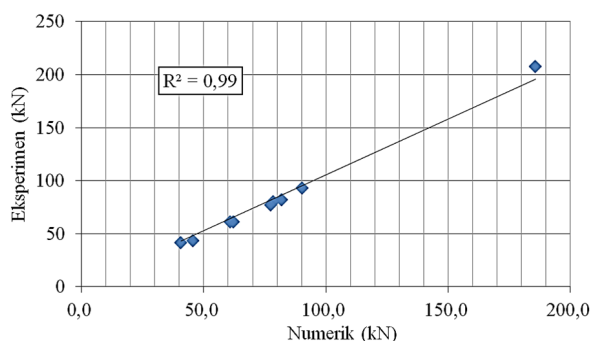
Gambar 10 memperlihatkan FE model AF4 dan *boundary conditions* dimana kedua ujungnya diasumsikan adalah perletakan sendi sesuai dengan kondisi pada saat dilakukan pengujian laboratorium. Posisi beban tekuk aksial berada pada sepanjang sentris sumbu Y dengan memperhitungkan perubahan eksentrisitasnya yang akan dipelajari di bagian berikutnya.



Gambar 10. Boundary condition pada sumbu pelat AF4

3.3 Verifikasi hasil FEA

Sebelumnya telah dilakukan pengujian eksperimen terhadap sembilan korosi pelat baja (AF1-AF9). Hasil pengujian tersebut kemudian diverifikasi menggunakan metode FEA dengan membandingkannya. Gambar 11 memperlihatkan hubungan perbandingan beban tekuk *ultimate* antara hasil pengujian eksperimen dengan numerik. Dengan nilai *coefficient of correlation* $R^2=0.99$ mengindikasikan keakuratan dan posibilitas metode numerik untuk mengevaluasi sisa kekuatan korosi pelat baja.



Gambar 11. Perbandingan beban tekuk *ultimate* eksperimen dan numerik

3.4 Mode karakteristik tekuk

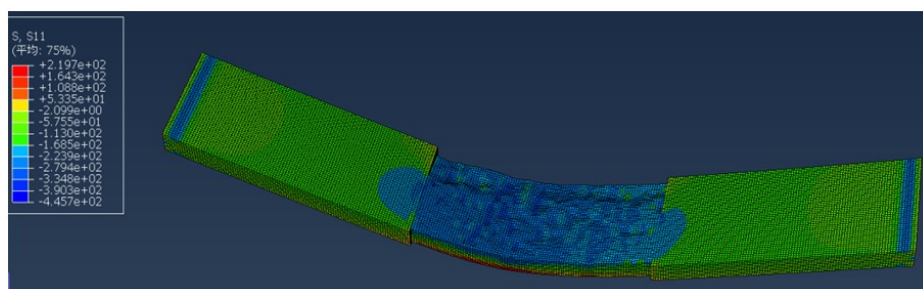
Gambar 12(a) dan (b) memperlihatkan beban maksimum pada model spesimen AF4 dan tabel tegangan aksial dengan perilaku pasca tekuk dimana warna merah mengindikasikan tarik (+) hingga model spesimen mengalami tekuk (+) dengan indikasi warna biru. Kerusakan tekuk terdistribusi disepanjang spesimen FEM dan mencapai kapasitas beban ijin hingga menyebabkan tekuk total seperti terlihat pada Gambar 12(a). Kemudian, Gambar 12(b) memperlihatkan suatu bagian spesimen FEM yang mengalami perilaku pasca tekuk. Hal tersebut karena kerusakan tekuk terkonsentrasi pada tebal minimum (t_{min}) pelat hingga menghasilkan tekuk lokal.

4. Parametric Study dengan Korosi Pelat Strip Baja

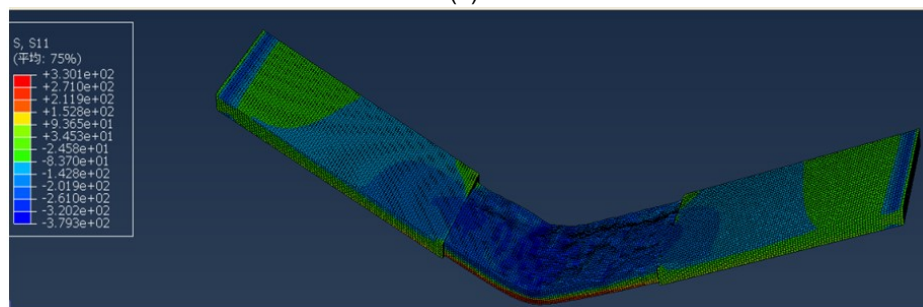
4.1 Korosi pelat strip baja

Perubahan kekuatan sisa terhadap perubahan dimensi spesimen korosi pelat *strip* baja juga telah dianalisis sebelumnya. Spesimen diperoleh dari potongan horizontal *flange girder Ferry Contact Bridge* yang terkorosi selama bertahun-tahun. Peningkatan kerusakan material baja oleh korosi disebabkan karena terendam air sehingga mereduksi ketebalannya, dimana tebal awalnya adalah 12mm. Kemudian, karakteristik data materialnya diperoleh dari analisis eksperimen sesuai dengan dimensi pengujian JIS no.5 yaitu Tegangan leleh $\sigma_y=259,7$ [MPa], Modulus elastisitas $E=196,5$ [GPa] dan *Poisson's ratio* $\nu=0,275$.

Delapan Korosi pelat *strip* baja dibentuk dengan lebar seragam sebesar 30 mm dan tinggi berbeda-beda sebesar masing-masing 150 mm - 450 mm (CF1501-CF4502). Spesimen tersebut dibersihkan dengan menggunakan



(a)



(b)

Gambar 12. FEM AF4 (a) tekuk total (b) tekuk lokal

bahan kimia penghilang lapisan cat dan sikat besi. Kemudian, *Grid points* dengan interval 5 mm dibuat pada salah satu permukaan spesimen dan diukur ketebalannya dengan instrumen pengukur ketebalan yang dapat membaca tiap-tiap *grid point* secara langsung dengan sekali pengukuran. **Tabel 4** memperlihatkan hasil pengukuran ketebalan korosi pelat *strip* baja.

4.2 Hasil dan pembahasan

Tabel 5 memperlihatkan hasil kuat tekan dan mode tekuk pada korosi pelat *strip* baja dengan analisis *finite element*. Seperti terlihat bahwa hubungan antara sisa kekuatan pelat terhadap panjang efektif tekuk sangat berpengaruh. Dimana jika semakin panjang tekuk efektif maka sisa kekuatan korosi pelat *strip* baja cenderung semakin kecil dan sebaliknya. Lebih lanjut, untuk spesimen yang memiliki panjang tekuk efektif seragam, terlihat bahwa jika semakin besar sisa ketebalan pelat, maka sisa kekuatan dan kekakuan korosi pelat *strip* baja akan cenderung semakin kecil. Hal tersebut disebabkan luas area permukaan pelat

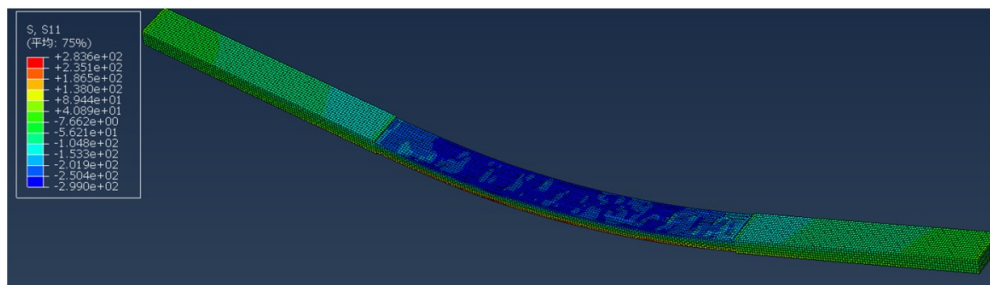
telah banyak tereduksi oleh korosi. Sehingga, tekuk total terjadi pada saat mengalami beban maksimum (**Gambar 13a**) dan selanjutnya akan mengali perilaku pasca tekuk pada area permukaan ireguler pelat *strip* dengan ketebalan minimum (t_{min}) sehingga terjadi tekuk lokal (**Gambar 13b**).

Tabel 5. Hasil analisis FE

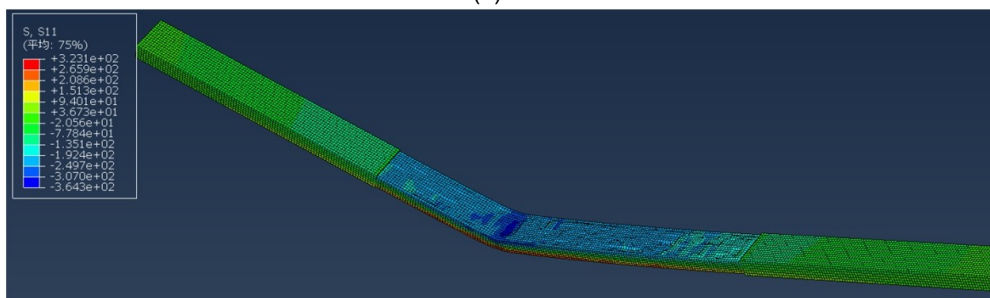
Spesimen	Sisa kekuatan tekuk (kN)	Mode tekuk
CF4501	5,98	+
CF4502	4,28	+
CF3001	10,07	+
CF3002	7,77	+
CF3003	8,4	+
CF3004	9,47	+
CF1501	24,39	-
CF1502	14,91	+

Tabel 4. Hasil pengukuran ketebalan korosi pelat *strip* baja

Spesimen	Panjang tekuk efektif (mm)	Tebal pelat rata - rata t_{avg} (mm)	Tebal pelat minimum t_{min} (mm)	Tebal minimum rata - rata pelat t_{mavg} (mm)	Tebal rata - rata pertengahan pelat t_{cavg} (mm)
CF4501	840	9,237	6,86	8,313	9,34
CF4502	840	8,333	6,03	7,219	7,255
CF3001	690	9,301	6,51	8,527	9,345
CF3002	690	8,463	6,27	7,58	8,226
CF3003	690	8,727	7,29	8,041	8,916
CF3004	690	9,086	7,71	8,639	8,888
CF1501	540	9,623	6,81	9,017	9,81
CF1502	540	8,181	5,63	7,07	8,409



(a)



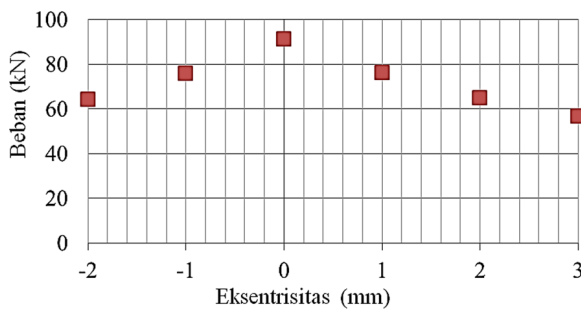
(b)

Gambar 13. Korosi pelat *strip* baja (a) tekuk total (b) tekuk lokal

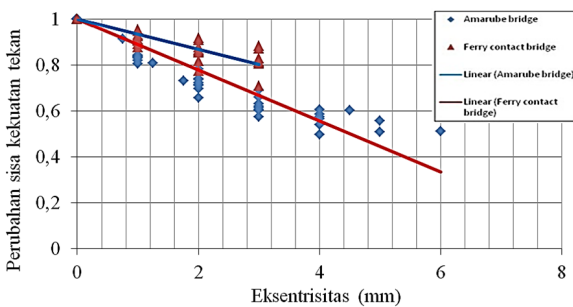
5. Parametric Study dengan Perubahan Sejumlah Eksentrisitas

Perubahan sisa kekuatan karena adanya perubahan sejumlah eksentrisitas pada korosi pelat baja (AF1-AF9) dan korosi pelat strip baja (CF1501-CF4502) yang mengalami beban tekuk diverifikasi pada bagian ini dengan total parametric study adalah 110 patterns. Sebagai contoh adalah spesimen AF2 dimana tebal spesimen terbagi menjadi dua bagian yaitu dengan sumbu axis bersifat netral. Gambar 14 memperlihatkan perubahan jarak sumbu axis terhadap beban yang terjadi.

Dari hasil analisis secara numerik maka Gambar 15 memperlihatkan perubahan sisa kekuatan tekuk spesimen dengan adanya perubahan eksentrisitas. Dipahami bahwa ketika kuat tekan menurun, eksentrisitas akan meningkat secara linear. Oleh karena itu, seperti halnya kekuatan ultimate, kuat tekuk juga tergantung pada lebar, tebal, dan panjang efektif tekuk spesimen. Oleh karenanya, diperlukan ketelitian dan kehati-hatian dalam menentukan sentrisitasnya.



Gambar 14. Hubungan antara perubahan netral axis dan beban spesimen AF2



Gambar 15. Hubungan perubahan sisa kekuatan tekuk-eksentrisitas

6. Rumusan Sisa Kekuatan Tekuk

Seperti pembahasan sebelumnya bahwa hasil yang diperoleh dari analisis eksperimen dan numerik terhadap sisa kekuatan tekuk korosi pelat baja sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu bentuk permukaan, tingkat korosi, panjang efektif tekuk dan perubahan sejumlah eksentrisitasnya. Secara statistik akan sangat dipertimbangkan faktor-faktor pengaruh tersebut terhadap hasil sisa kekuatan pelat baja yang mengalami beban tekuk. Sehingga, perlu dikembangkan suatu rumusan yang mencakup faktor-faktor pengaruh yang terjadi.

Diketahui bahwa boundary condition adalah perletakan sendi. Sehingga, beban tekuk P_{cr} menjadi:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{3}$$

dimana E adalah modulus elastisitas dan L adalah panjang efektif tekuk. Kemudian, I adalah Momen inersia sekitar area weak axis seperti:

$$I = \frac{bt^3}{12} \tag{4}$$

apabila Persamaan 4 disubstitusi ke dalam Persamaan 3 maka akan diperoleh Persamaan 5, yaitu:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EBt^3}{12L^2} \tag{5}$$

Dari Persamaan 5, pengaruh lebar B dan panjang efektif tekuk L terhadap beban tekuk sudah menjadi jelas. Oleh karena itu, tebal pelat efektif (t_{eff}) pada evaluasi sisa kekuatan tekuk korosi pelat baja sangat diperhitungkan. Fenomena tekuk terhadap korosi pelat baja menggambarkan kurva sin pertama terbentuk setelah tegangan yang terjadi disepanjang spesimen uji.

Gambar 16 memperlihatkan hubungan antara unit beban dan tebal efektif pelat tanpa adanya eksentrisitas. Dari gambar tersebut unit beban P akan menghasilkan rumusan seperti Persamaan 6, yaitu:

$$P = \frac{12 P_{cr} L^2}{\pi^2 EB} \tag{6}$$

Jadi, disini dianggap bahwa tebal efektif pelat (t_{eff}) adalah sama dengan tebal rata-rata pelat (t_{avg}). Meskipun t_{eff} dipengaruhi oleh tebal awal pelat (t_0) dan tebal minimum pelat (t_{min}), namun dianggap sangat kecil pengaruhnya dengan nilai $C=0.03$ ($0 < C < 1$) seperti Persamaan 7 dan Persamaan 8, adalah:

$$t_{eff} = t_{avg} - C(t_0 - t_{min}) \tag{7}$$

$$t_{eff} = t_{avg} \tag{8}$$

Kemudian, karena adanya pengaruh perubahan eksentrisitas terhadap sisa kekuatan pelat baja maka akan menghasilkan hubungan antara koefisien koreksi sisa kuat tekan β dengan perbandingan eksentrisitas α seperti terlihat pada Gambar 17. Dimana nilai koefisien koreksi R^2 menunjukkan korelasi yang tinggi. Untuk mendapatkan koefisien koreksi sisa kuat tekan β maka beban eksentris P_e dibagi beban tak eksentris P_0 seperti Persamaan 9 dan perbandingan eksentrisitas α seperti Persamaan 10. Jika kedua persamaan tersebut (Persamaan 9 dan 10) dihubungkan dan dengan bantuan analisis regresi maka akan menghasilkan Persamaan 11.

$$\beta = \frac{P_e}{P_0} \tag{9}$$

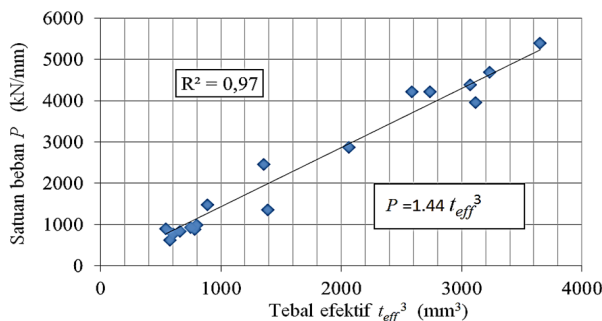
$$\alpha = \frac{eBt_{avg}}{t_0^3} \quad (10)$$

$$\beta = -0.39\alpha + 1 \quad (11)$$

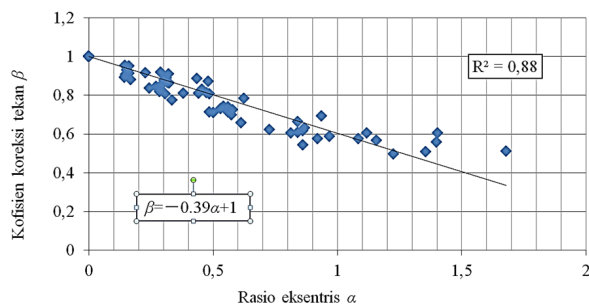
dimana e adalah eksentrisitas, B adalah lebar pelat, t_{avg} adalah tebal rata-rata pelat, dan t_0 adalah tebal awal pelat. Oleh karena itu, koefisien koreksi sisa kuat tekan β sangat berpengaruh terhadap perhitungan sisa kekuatan korosi pelat baja karena adanya pengaruh sejumlah eksentrisitasnya. Sehingga dalam perhitungan secara matematis untuk mendapatkan hasil sisa kekuatan korosi pelat baja yang mengalami beban tekuk dapat mengadopsi formula baru seperti pada **Persamaan 12**.

$$P_{cr} = \frac{0.12\beta\pi^2EBt_{eff}^3}{L^2} \quad (12)$$

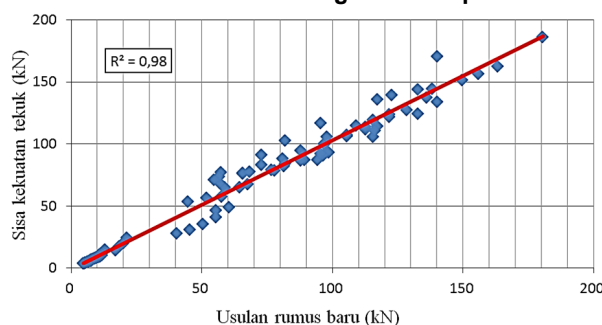
Gambar 18 memperlihatkan hubungan antara metode analitis dengan usulan rumus seperti **Persamaan 12** dengan nilai koefisien koreksi R^2 menunjukkan respon sangat baik.



Gambar 16. Hubungan antara satuan beban dengan tebal efektif pelat



Gambar 17. Hubungan antara β - α



Gambar 18. Evaluasi usulan rumus baru

7. Kesimpulan

Pada penelitian ini, karakteristik mekanik dari pengujian tekuk pelat baja yang mengalami korosi dilakukan secara eksperimen dan numerik. Hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode eksperimen dan numerik dapat dipergunakan untuk menentukan dan mengevaluasi sisa kekuatan korosi pelat baja yang telah mengalami beban tekuk.
2. Fenomena tekuk terjadi disepanjang pengujian dimana tegangan yang terjadi pada korosi baja menimbulkan sifat tekuk total karena akibat ireguler permukaan pelat baja dan telah mencapai kapasitas ijin kekuatannya dan tekuk lokal terjadi akibat adanya tegangan yang terkonsentrasi pada tebal minimum pelat (t_{min}).
3. Adanya pengaruh panjang tekuk efektif dan rasio perubahan sejumlah beban eksentris α sangat berpengaruh terhadap sisa kekuatan korosi pelat baja serta koefisien sisa kekuatan tekuk β . Maka bila dihubungkan akan diperoleh rumusan sebagai berikut:

$$\beta = -0.39\alpha + 1$$

$$P_{cr} = \frac{0.12\beta\pi^2EBt_{eff}^3}{L^2}$$

5. Hasil analitis dan usulan rumus baru memperlihatkan kesesuaian keduanya yang sangat baik dengan nilai koefisien koreksi $R^2=0.98$.

Daftar Pustaka

- Ahn, J.H., Kainuma, S., Yasuo, F., Takehiro, I., 2013, Repair Method and Residual Bearing Strength Evaluation of A Locally Corroded Plate Girder at Support, *Journal of Engineering Failure Analysis*, Vol. 33, 398-418.
- Beaulieu, L.V., 2010, Compression Strength of Corroded Steel Angle Members, *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 66, 1366-1373.
- Japanese Industrial Standard [JIS] G3101 SS400, 1995, *Rolled Steel for General Structure*.
- Jiang, X., Soares, C.G., 2011, Ultimate Capacity of Rectangular Plates with Partial Depth Pits under Uniaxial Loads, *Journal of Marine Structures*, Vol. 26, 27-41.
- Jiang, X., Soares, C.G., 2012, A Close Form Formula to Predict the Ultimate Capacity of Pitted Mild Steel Plate under Biaxial Compression, *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 59, 27-34.
- Kayser, J.R., Nowak, A.S., 1989, Reliability of Corroded Steel Girder Bridges, *Journal of Structural Safety*, Vol 6, 53-63.

- Miyamoto, A., Kawamura, K., Nakamura, H., 2001, Development of A Bridge Management System for Existing Bridges, *Journal of Advanced in Engineering Software*, Vol. 32, 821-833.
- Nakai, T., Matsuhsita, H., Yamamoto, N., 2006, Effect of Pitting Corrosion on the Ultimate Strength of Steel Plates Subjected to In-plane Compression and Bending, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 11, 52-64.
- Ok, D., Pu, Y., Incecik, A., 2007, Computation of Ultimate Strength of Locally Corroded Unstiffened Plates under Uniaxial Compression, *Journal of Marine Structures*, Vol. 20, 100-114.
- Paik, J.K., Lee, J.M., Ko, M.J., 2003, Ultimate Compressive Strength of Plate Elements with Pit Corrosion Wastage, *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol 217, 185-200.
- Rahbar-Ranji, A., 2012, Ultimate Strength of Corroded Steel Plates with Irregular Surfaces under In-plane Compression, *Journal of Ocean Engineering*, Vol 54, 261-269.
- Roberge, P.R., 2008, *Corrosion Engineering: Principles and Practice*, MacGraw-Hill, New York, US.
- Sarveswaran, V., Smith, J.W., Blockley, D.I., 1998, Reliability of Corrosion-Damaged Steel Structures Using Interval Probability Theory, Vol. 20, 237-255.
- Sharifi, Y., Paik, J.K., 2011, Ultimate Strength Reliability Analysis of Corroded Steel-Box Girder Bridges, *Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 49, 157-166.
- Silva, J.E., Garbatov, Y., Soares, C.G., 2013, Ultimate Strength Assessment of Rectangular Steel Plates Subjected to A Random Localised Corrosion Degradation, *Journal of Engineering Structures*, Vol. 52, 295-305.
- Xie, C., Huang, H-Z., 2016, A Probabilistic Physics of Failur Approach for Structure Corrosion Reability Analysis, *International Journal of Corrosion*, Vol. 2016, 1-7.