



Berkolaborasi untuk Kemajuan Penelitian, Pengabdian dan Pembelajaran

# Pengaruh Pola Deteriorasi Heterogen Spasial Terhadap Kekuatan dan Daktilitas Pilar Jembatan Beton Bertulang yang Terkorosi

\*Rendy Siagian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia

\*Corresponding author: [rendy012@gmail.com](mailto:rendy012@gmail.com)

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Kata Kunci:</b><br/>Pilar jembatan;<br/>Beton bertulang;<br/>Korosi;<br/>Deteriorasi Nonhomogen;<br/>Analisis Nonlinier</p> <p><b>Keywords:</b><br/>Bridge pillars;<br/>Reinforced concrete;<br/>Corrosion;<br/>Nonhomogeneous<br/>Deterioration;<br/>Nonlinear Analysis</p> | <p><b>Abstract</b> — This study aims to study the effect of corrosion on Reinforced Concrete (RC) pillars on the overall seismic performance of the bridge. In this context, after statistical evaluation of large databases of real structures, a consistent set of bridges and piers has been selected as a representative sample from typical bridge profiles, piers heights and cross-sections and material properties. First, pushover analysis of isolated pillars with different corrosion patterns and intensities was performed to evaluate the residual strength and ductility of the corroded pillars. A second, seismic static and nonlinear dynamic analysis of the bridge with corroded piers was carried out to evaluate the effect of deterioration on the overall seismic performance. Due to exposure to certain environmental conditions or water percolation of the superstructure, it is often the case that corrosion is unevenly distributed over the pillars resulting in spatially inhomogeneous deterioration patterns. Nonlinear modeling of this type of situation is a particular challenge with regard to the description of deterioration patterns and the calibration of material properties. To this end, a fiber-based finite-element multi-level modeling approach has been developed and implemented in a dedicated Open Sees Py software that allows the user to accurately model RC piers that are subject to arbitrary corrosion patterns, down to their eventual boundary states. In this work, special case studies of typical RC rectangular hollow bridges extracted from the above-mentioned databases with different intensities and corrosion patterns are studied. In particular, the effect of corrosion damage on residual strength and ductility was studied. The results show that depending on the intensity and pattern, significant variations of strength and ductility can be observed with respect to the undamaged condition.</p> <p><b>Abstrak</b>— Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh korosi pada pilar Beton Bertulang (RC) terhadap kinerja seismik jembatan secara keseluruhan. Dalam konteks ini, setelah evaluasi statistik database besar dari struktur nyata, serangkaian jembatan dan pilar yang konsisten telah dipilih sebagai perwakilan sampel dari profil jembatan tipikal, ketinggian dan penampang dermaga serta sifat material. Analisis pertama, pushover dari pilar terisolasi dengan pola dan intensitas korosi yang berbeda dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan sisa dan daktilitas pilar yang terkorosi. Analisis kedua, seismik statik dan dinamik nonlinier dari jembatan dengan pilar yang terkorosi dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh deteriorasi pada kinerja seismik secara keseluruhan. Karena paparan kondisi lingkungan tertentu atau perkolasi air dari superstruktur, sering terjadi bahwa korosi tidak terdistribusi secara merata di atas pilar yang menghasilkan pola deteriorasi spasial yang tidak homogen. Pemodelan nonlinier dari jenis situasi ini merupakan tantangan khusus terkait dengan deskripsi pola deteriorasi dan kalibrasi sifat material. Untuk tujuan ini, pendekatan pemodelan multi-level berdasarkan elemen hingga berbasis serat telah dikembangkan dan diimplementasikan dalam perangkat lunak Open Sees Py khusus yang memungkinkan pengguna untuk secara akurat memodelkan dermaga RC yang tunduk pada pola korosi arbitrer, hingga status batas akhirnya. Dalam pekerjaan ini, studi kasus khusus dari jembatan berlubang persegi panjang RC khas yang diekstraksi dari database yang disebutkan di atas dengan intensitas dan pola korosi yang berbeda dipelajari. Secara khusus, pengaruh kerusakan akibat korosi pada kekuatan sisa dan keuletan dipelajari. Hasil menunjukkan bahwa tergantung pada intensitas dan pola, variasi yang signifikan dari kekuatan dan keuletan dapat diamati sehubungan dengan kondisi yang tidak rusak.</p> |
|--|--|

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License.



# 1 PENDAHULUAN

Evaluasi pengaruh kerusakan pilar Beton Bertulang (RC) yang diinduksi korosi pada kinerja seismik jembatan yang terletak di daerah rawan gempa merupakan topik penting untuk penilaian sisa umur struktur tua.

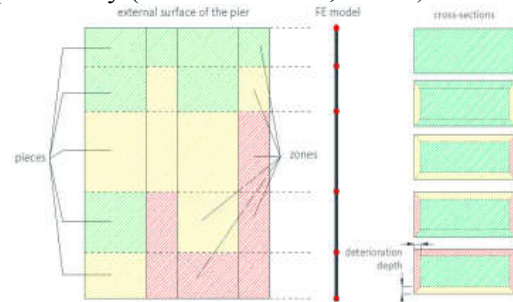
Sebuah proyek penelitian yang berfokus pada studi tentang dampak korosi tulangan pada kinerja seismik jembatan saat ini sedang berlangsung dan memberikan motivasi untuk pekerjaan ini. Dalam konteks ini, aspek penting terkait dengan fakta bahwa kekuatan dan daktilitas pilar jembatan beton bertulang yang mengalami aksi horizontal dapat dipengaruhi secara signifikan oleh korosi tulangan. Untuk mempelajari fenomena ini, analisis numerik nonlinier dari struktur beton bertulang yang mengalami deteriorasi dapat dilakukan (Andisheh et al., 2016). Sebagian besar studi yang tersedia pada struktur RC yang terkorosi mempertimbangkan distribusi korosi yang seragam pada elemen, atau bahkan pada seluruh struktur (Li et al., 2018). Namun, di pilar jembatan yang sebenarnya, karena perkolasi air dari superstruktur atau paparan khusus terhadap agen atmosfer, pola korosi yang sangat tidak seragam sering diamati. Dalam beberapa penelitian yang tersedia, ketidakseragaman korosi biasanya dianggap hanya pada elevasi, sementara tidak ada variasi yang dipertimbangkan dalam penampang. Pemodelan jenis situasi ini jauh lebih menantang daripada pemodelan dermaga yang tidak rusak karena hukum konstitutif dan sifat material menjadi tergantung pada korosi dan perlu ditentukan oleh hukum konstitutif yang tepat atas geometri yang berpotensi kompleks yang mencerminkan pola korosi yang tidak seragam baik di ketinggian maupun di dalam. lintas-bagian (Bernardini et al. 2022a).

# 2 METODOLOGI PENELITIAN

Analisis pertama yaitu menganalisis Kinerja seismik jembatan dengan pilar RC yang terkorosi. Kinerja seismik jembatan pada dasarnya ditentukan oleh perilaku elemen struktur yang mampu mentransfer aksi horizontal seperti dermaga, tumpuan dan sambungan atau pengekangan struktur. Struktur yang menua tidak dapat dihindari mengalami degradasi kinerja elemen-elemen tersebut dan, oleh karena itu, penyelidikan kemungkinan konsekuensi penurunan struktural pada kinerja

seismik jembatan yang ada adalah masalah dasar dengan minat ilmiah dan dampak teknologi yang signifikan (Gino et al. 2021 , Castaldo et al.2022).

Analisis kedua yaitu Pendekatan pemodelan multi level untuk pemodelan pola korosi yang tidak seragam. Pendekatan pemodelan spesifik yang mampu memprediksi respons pilar RC yang tunduk pada pola korosi arbitrer melalui elemen balok-kolom berbasis serat nonlinier telah diusulkan (Bernardini et al., 2022a, 2022c) dan diimplementasikan dalam kerangka kerja OpenSeesPy (Bernardini et al., 2022b).



Gambar 1. Contoh pemodelan korosi tidak seragam untuk bagian tiang pancang berbentuk persegi panjang (Bernardini et al. (2021).

Intensitas deteriorasi kemudian ditentukan dengan menetapkan pada setiap zona Indeks Deteriorasi Global (GDI) yang didefinisikan sebagai seperangkat Indeks Deteriorasi Lokal (LDI) khusus material yang akan digunakan untuk menentukan sifat material serat sesuai dengan hukum degradasi yang sesuai. Secara umum, skala GDI yang berbeda dan LDI yang berbeda dapat digunakan. Dalam pekerjaan ini, skala GDI berdasarkan 5 level telah dipilih untuk mengkarakterisasi intensitas deteriorasi yang mungkin terjadi (Tabel 1). Setiap GDI ditandai dengan nilai spesifik 3 LDI: lebar retak ( $w_{cr}$ ) untuk beton bebas dan kehilangan massa baja untuk tulangan longitudinal ( $\psi_L$ ) dan tulangan transversa ( $\psi_T$ ) (Tabel 1).

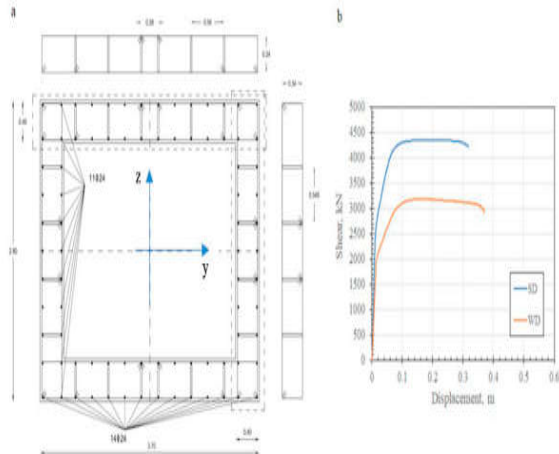
Tabel 1. Indeks Deteriorasi Lokal yang digunakan untuk setiap tingkat kerusakan.

| GDI | $w_{cr}$ (mm) | $\psi_L$ | $\psi_T$ |
|-----|---------------|----------|----------|
| 10  | 0             | 0,00     | 0,00     |
| 11  | 1             | 0,05     | 0,05     |
| 12  | 2             | 0,15     | 0,15     |
| 13  | 3             | 0,20     | 0,20     |
| 14  | 5             | 0,30     | 0,30     |

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Respon dermaga yang tidak rusak

Untuk mengevaluasi degradasi pada perilaku struktural akibat korosi tulangan. Untuk tujuan ini, respon dari pier yang tidak rusak (I0) dihitung terlebih dahulu untuk menetapkan kondisi referensi sehubungan dengan pengaruh korosi yang dievaluasi. Model numerik yang digunakan untuk dermaga yang rusak sama dengan yang dijelaskan di atas, dengan satu-satunya perbedaan bahwa tidak ada efek korosi yang diperhitungkan ( $w_{cr}$ ,  $\psi_L$ ,  $\psi_T = 0$ ).



Gambar 2. (a) Penampang dermaga yang diteliti. Tulangan melintang memiliki diameter 10 mm dan jarak 200 mm, tinggi seragam, penutup beton bening adalah 30 mm dan (b) profil pushover untuk analisis yang tidak rusak, Arah pembebanan Kuat dan Lemah.

Gambar 2b kemudian menunjukkan kurva pushover yang diperoleh dari dermaga yang tidak rusak yang dinyatakan dalam total base shear versus top displacement untuk perpindahan pembebanan sepanjang Arah Kuat (SD) dan Arah Lemah (WD) positif.

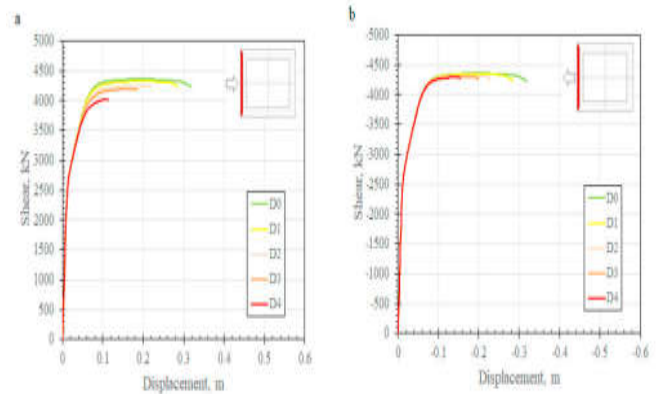
#### 3.2 Pengaruh intensitas kerusakan untuk berbagai pola penampang

##### 1. Arah yang Kuat pada Pola A+ dan A-

Pada bagian ini kurva kapasitas yang dihitung untuk berbagai skenario deteriorasi disajikan dengan membandingkan respons yang diperoleh untuk setiap pola penampang dengan adanya berbagai intensitas deteriorasi, dengan mempertimbangkan secara terpisah dua arah pembebanan (Kuat dan Lemah). Dalam legenda dan sumbu sebagian besar angka, intensitas penurunan dilambangkan dengan angka yang sama didahului dengan huruf D, bukan I. Yakni,

misalnya, intensitas I1, I2,... yang didefinisikan pada Tabel 1 dilambangkan dengan D1, D2,... dalam Gambar

Gambar 3 menunjukkan kurva pushover untuk setiap intensitas kerusakan (ditandai dengan warnanya sendiri) bersama dengan dermaga yang tidak rusak berwarna hijau untuk pola penampang A di mana korosi terjadi pada satu sisi pendek. Karena pola A tidak simetris, analisis telah dilakukan untuk arah positif dan negatif (A+,A-) (Gambar3 (a) dan(b)).



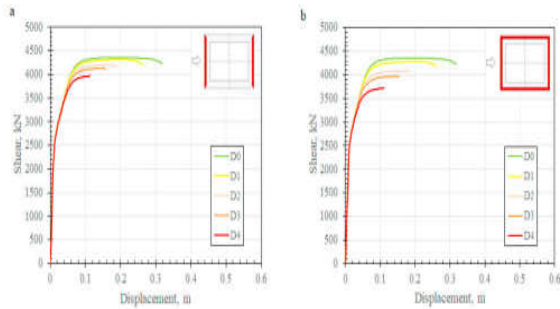
Gambar 3. Skenario A, perbandingan hasil untuk semua intensitas korosi: (a) Arah Kuat positif (A+), (b) Arah Kuat negatif (A-).

Seperti yang dapat dilihat, meskipun pola penampangnya sama, perbedaan yang signifikan antara kedua arah tetap terlihat. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa analisis A+ dan A- (Gambar 3a dan 3b) dicirikan oleh adanya deteriorasi pada zona yang masing-masing mengalami tegangan tarik dan tekan.

Ketika korosi terjadi di zona kompresi, degradasi perpindahan ultimat dengan kekuatan dasarnya konstan diamati. Sebaliknya, ketika deteriorasi terjadi pada zona tarik, degradasi kekuatan dan keuletan diamati dengan pengaruh yang lebih nyata untuk intensitas deteriorasi yang lebih parah. Patterns C and E.

##### 2. Pola C dan E

Perbandingan yang sama di atas yang dijelaskan untuk pola penampang A+ dan A- sekarang disajikan di sini untuk pola C dan E yang melibatkan korosi pada kedua sisi yang lebih pendek dan korosi di seluruh dermaga. Berbeda dari skenario A, ini adalah skenario simetris, yaitu profil pushover untuk setiap intensitas korosi diplot hanya untuk SD+ (Gambar 4 (a, b)).

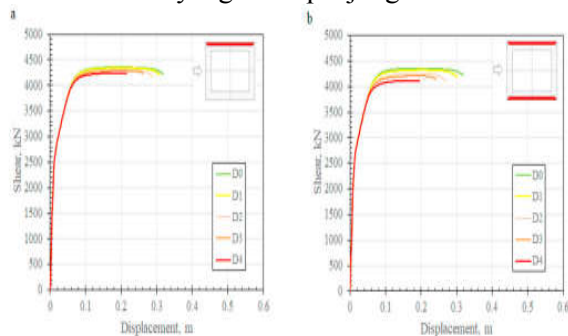


Gambar 4. Pola C (a) dan E (b): perbandingan hasil yang diperoleh untuk semua intensitas korosi dalam hal profil pushover

Seperti yang dapat dilihat, pola C dan E menunjukkan tren yang mirip dengan yang diamati untuk pola A+ dengan kombinasi degradasi kekuatan dan perpindahan ultimit, yang meningkat dengan intensitas korosi. Jelasnya, pola E dicirikan oleh perluasan yang lebih besar dari zona yang mengalami deteriorasi, sehingga entitas degradasi secara sistematis lebih menonjol sehubungan dengan pola C.

### 3. Pola B dan D

Demi kelengkapan, Gambar 5 (a) dan (b) menunjukkan kurva kapasitas dermaga yang diperoleh untuk pola kerusakan penampang B dan D yang ditandai dengan terjadinya korosi, dengan intensitas yang berbeda, sepanjang satu atau kedua sisi yang lebih panjang.

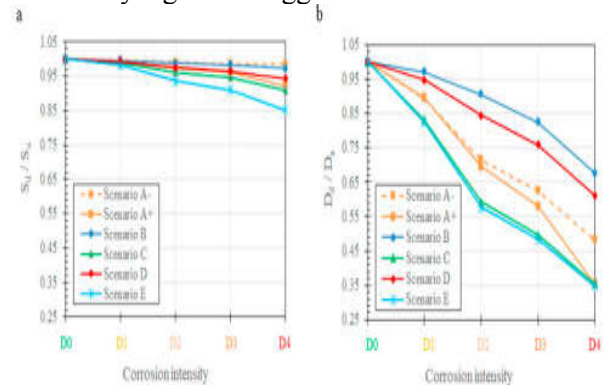


Gambar 5. Skenario B (a) dan D (b), SD+, perbandingan hasil yang diperoleh untuk semua intensitas korosi dalam hal profil pushover.

Hasilnya dengan jelas menunjukkan bahwa, seperti yang diharapkan, korosi yang terdistribusi sepanjang sisi yang sejajar dengan arah pembebanan memiliki pengaruh yang lebih kecil dibandingkan dengan korosi yang dihasilkan oleh kerusakan dengan intensitas yang sama tetapi terjadi di sepanjang sisi yang sejajar dengan sumbu netral tekukan.

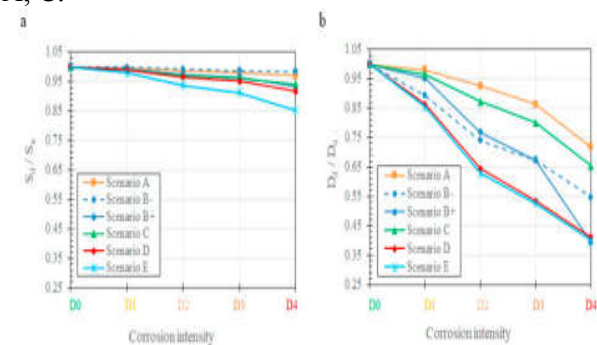
### 3.3 Rangkuman hasil Arah Kuat dan hasil Arah Lemah

Pada Gambar 6 semua hasil yang diperoleh dengan mendorong pier sepanjang SD dirangkum dan dibandingkan melalui plot kekuatan dan perpindahan ultimate yang dinormalisasi sehubungan dengan nilai yang sesuai dari pier yang tidak rusak, versus intensitas kerusakan. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa berbagai pola dan intensitas deteriorasi menghasilkan pengaruh yang berbeda secara signifikan terhadap kapasitas dermaga, yang menyebabkan penurunan kekuatan hingga 15% dan pengurangan perpindahan akhir hingga 65% sehubungan dengan dermaga yang tidak rusak untuk kasus pola E (korosi pada empat sisi) dan intensitas yang lebih tinggi I4.



Gambar 6. Perbandingan hasil yang diperoleh untuk semua intensitas korosi: (a) degradasi ketahanan pier (Shear) dan (b) daktilitas (Displacement) sehubungan dengan kasus tidak rusak ( $S_u$ ,  $D_u$ ), Arah Kuat.

Gambar 7 akhirnya menunjukkan perbandingan analog untuk analisis yang dilakukan dengan mendorong WD yang menunjukkan tren serupa dengan yang diamati untuk SD, dengan pola B dan E memainkan peran yang sama seperti pola A, C.



Gambar 7. Perbandingan hasil yang diperoleh untuk semua intensitas korosi: (a) degradasi ketahanan pier (Shear) dan (b) daktilitas (Displacement) sehubungan dengan kasus tidak rusak ( $S_u$ ,  $D_u$ ), Arah Lemah.

## 4 KESIMPULAN

Analisis nonlinier telah dilakukan oleh aplikasi web berbasis OpenSeesPy yang menerapkan pendekatan pemodelan kerusakan multi-level menggunakan elemen hingga balok-kolom serat. Hasil menunjukkan bahwa korosi yang tidak seragam dapat menghasilkan kekuatan yang signifikan dan pengurangan perpindahan akhir sehubungan dengan kapasitas dermaga yang tidak rusak dengan pengaruh yang berbeda untuk korosi yang terjadi di zona kompresi atau tegangan. Beberapa pengembangan saat ini sedang berlangsung dengan tujuan untuk mempertimbangkan fenomena lebih lanjut seperti kapasitas geser, selip batang, tekuk tulangan dan untuk mempelajari pilar yang berbeda dan bahan yang berbeda.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung penelitian ini.

## REFERENCES

- [1] Andisheh, K., Scott, A., & Palermo, A. (2016). Seismic behavior of corroded RC bridges, review and research gaps. *International Journal of Corrosion*.
- [2] Li, D., Wei, R., Xing, F., Sui, L., Zhou, Y., & Wang, W. (2018). Influence of Non-uniform corrosion of steel bars on the seismic behavior of reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*, 167, 20-32.
- [3] Bernardini D., Ruta D., di Re P., Paolone A. (2022a). Modeling non-uniform corrosion in reinforced concrete bridge piers. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, 200, 372-379.
- [4] Bernardini D., Carbone G., di Re P., La Morgia M., Mei A., Paolone A., Ruta D. (2022b). OpenSeesPy-based web application for pushover curve computation of RC Bridge piers subject to arbitrarily non-uniform corrosion patterns. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, in press
- [5] Bernardini D., Ruta D., di Re P., Paolone A. (2022c). A multi-level procedure for the modeling of reinforced concrete bridge piers subject to arbitrarily non-uniform corrosion patterns. Submitted
- [6] Castaldo P., Gino D., Marano G. C., Mancini G. (2022). Aleatory uncertainties with global resistance safety factors for non-linear analyses of slender reinforced concrete columns, *Engineering Structures*, 2022; 255; 113920
- [7] Coronelli, D., & Gambarova, P. (2004). Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines. *Journal of structural engineering*, 130(8), 1214-1224.
- [8] Gino D., Castaldo P., Giordano L., Mancini G. (2021): Model uncertainty in non-linear numerical analyses of slender reinforced concrete members, *Structural Concrete*, 2021, 22; 845-870
- [9] Imperatore, S., Rinaldi, Z., & Drago, C. (2017). Degradation relationships for the mechanical properties of corroded steel rebars. *Construction and Building Materials*, 148, 219-230.
- [10] Kashani, M. M., Salami, M. R., Goda, K., & Alexander, N. A. (2018). Non-linear flexural behaviour of RC columns including bar buckling and fatigue degradation. *Magazine of Concrete Research*, 70(5), 231-247.
- [11] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Observed stress-strain behavior of confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1827-1849.
- [12] Vu, N. S., Yu, B., & Li, B. (2017). Stress-strain model for confined concrete with corroded transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 151, 472-487.