



PERILAKU LENTUR STRUKTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN KOROSI TULANGAN HINGGA 50%

PINTA ASTUTI^{1*}

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Bantul, Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author: ✉ pinta.astuti@ft.umy.ac.id

Naskah diterima : 14 Desember 2021. Disetujui: 28 Maret 2023

ABSTRAK

Korosi tulangan pada struktur beton merupakan salah satu penyebab kerusakan yang paling berdampak di dunia. Oleh karena itu, banyak peneliti terdahulu yang telah mencari *unknown mechanism* terkait proses terjadinya korosi, efek kerusakan struktur akibat korosi terhadap kapasitas dan kinerjanya, dan metode intervensi atau perbaikan akibat kerusakan tersebut. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku lentur pada struktur balok beton bertulang dengan tingkat korosi tulangan longitudinal hingga 50%. Kuat tekan pada material beton tersebut adalah 30MPa, tegangan leleh pada tulangan utama dan tulangan samping adalah 420 MPa dan 280 MPa untuk tulangan sengkang. Dua jenis pembebanan yaitu beban titik dan beban merata yang didesain berdasarkan SNI 2847-2019 diaplikasikan pada permukaan atas struktur balok. Analisis penampang balok dilakukan dengan program Response-2000. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa level korosi 40% merupakan tingkat kritis dan kinerja struktur balok menurun secara signifikan akibat beban merata yang bekerja dan tingkat korosi 30% merupakan tingkat kritis akibat beban titik yang dapat diindikasikan dari nilai defleksi, momen kurvatur, pola retak, dan lebar retak.

Kata kunci : korosi; perilaku lentur balok; defleksi; momen kurvatur; pola retak

1. PENDAHULUAN

Korosi merupakan salah satu masalah serius dalam struktur khususnya beton bertulang. Beton merupakan bahan bangunan yang memiliki sifat basa, yang berarti beton dapat melindungi baja tulangan akibat adanya serangan korosi (Steffens et al., 2002). Konstruksi bangunan yang didirikan pada lingkungan agresif seperti daerah pesisir pantai ataupun ditengah laut memiliki dampak buruk terhadap struktur beton karena pada lingkungan mengandung zat-zat kimia yang sifatnya sangat reaktif terhadap unsur-unsur yang terdapat didalam beton sehingga beton sangat mudah mengalami disintegrasi atau rapuh (Khan et al., 2017). Pada beton yang lembab atau basah oleh medium yang sangat agresif, seiring berjalannya waktu akan terbentuk honeycomb atau retakan-retakan hingga akhirnya terjadi pengelupasan atau spalling (Zhang et al., 2021). Oleh karena itu, korosi yang terjadi pada baja tulangan tidak dapat lagi dihindari, terutama pada beton bertulang yang sudah terpapar lingkungan agresif dengan konsentrasi

karbon dioksida atau pada tingkat klorida yang tinggi, akan menghasilkan produk korosi berupa karat dengan volume 6 – 10 kali lipat dari ukuran baja normal sebelum korosi terjadi (Zhang et al., 2021). Zat asam yang berasal dari lingkungan akan membuat beton mengalami korosi, sehingga dapat terjadi ekspansi, keretakan, dan kehancuran pada beton (Yuan & Ji, 2009). Oleh karena itu, durabilitas merupakan faktor paling penting dalam pengelolaan struktur beton ini, dan dilakukan desain teknologi material untuk mengontrol laju korosi yang terjadi selama masa layan konstruksi (Afriansya et al., 2021).

Balok merupakan element struktur melintang atau miring yang memiliki fungsi sebagai penerus beban pelat maupun beban struktur yang berada di atasnya (Poupard et al., 2006). Dapat dikatakan bahwa beton bertulang merupakan beton struktural yang diberikan tulangan dengan diameter dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari jumlah baja prategang atau tulangan non-prategang yang ditarik sebelum beton dicor. Konstruksi balok beton bertulang dimaksudkan supaya balok dapat memiliki tingkat kekakuan dan gaya lentur, sehingga dapat memikul beban maupun gaya-gaya yang bekerja pada strukturnya. Seiring bertambahnya waktu baja tulangan yang digunakan pada balok beton bertulang akan mengalami korosi yang diakibatkan oleh udara, air laut, maupun larutan yang mengandung asam klorida, asam sulfat, serta zat asam sejenisnya (el Maaddawy & Soudki, 2007). Munculnya korosi pada permukaan tulangan baja akan menurunkan kualitas kekuatan pada tulangan baja sehingga penilaian korosi harus dilakukan untuk mengetahui tingkat risiko korosi pada infrastruktur beton bertulang, dan sangat penting untuk dilakukan secara berkala (Polder et al., 2014).

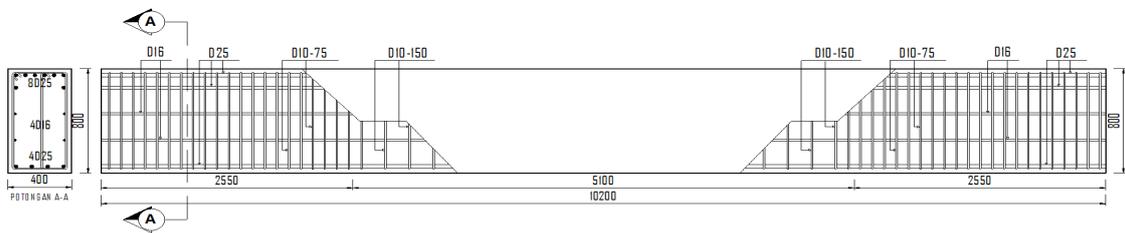
Hasil investigasi kerusakan balok beton berumur lebih dari 40 tahun yang terekspos pada lingkungan air laut dan didapatkan gambaran korosi alami yang terjadi menggunakan metode elektrokimia (Astuti et al., 2018). Dari hasil tersebut didapatkan kerusakan beton tersebut telah mencapai level akselerasi atau percepatan penurunan kualitas material dan kinerja struktur (Astuti et al., 2021). Hal ini mendukung tujuan penelitian ini agar dilakukan analisis untuk memprediksi perilaku struktur balok beton akibat korosi. Adapun metode perbaikan juga telah dilakukan menggunakan beberapa penelitian untuk mengkaji metode seperti mengaplikasikan proteksi katodik anoda korban dan inhibitor korosi, dan patch repair yang telah diaplikasikan pada specimen yang sama (Astuti et al., 2019) (Astuti et al., 2020).

Dengan adanya latar belakang masalah tersebut dan kurangnya informasi mekanisme proses kerusakan beton akibat korosi, maka dilakukan penelitian secara analitis guna mengetahui pengurangan volume tulangan baja dalam beton bertulang akibat kondisi korosi hingga 50% sehingga diketahui level korosi maksimum yang dapat ditoleransi pada tulangan beton.

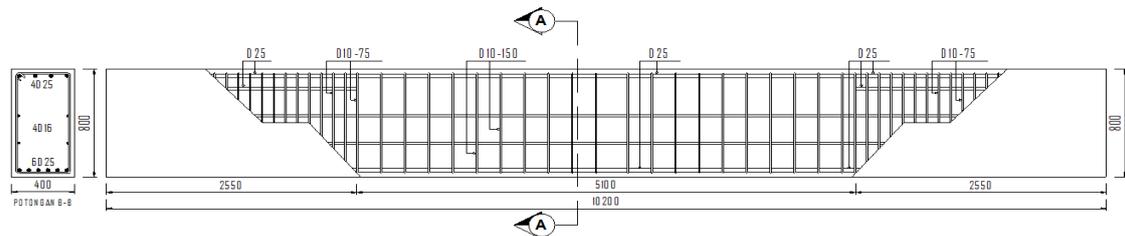
2. METODA PENELITIAN

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini yaitu balok beton berpenampang persegi, dengan dengan penampang 400 mm x 800 mm, dengan panjang bentang 10200 mm (2550 mm panjang daerah tumpuan dan 5100 mm panjang daerah lapangan). Tebal selimut beton (I_s) 40 mm, jarak antar tulangan geser sebesar 150 mm. Kuat tekan beton (f'_c) 30 MPa dengan mutu tulangan utama maupun tulangan sisi (*sidebar*) yaitu (f_y) 420 MPa dan tulangan geser (seengkang) menggunakan (f_y) 280 MPa. Tipe korosi yang digunakan adalah tipe seragam (*uniform*) yang terjadi di sepanjang bentang permukaan tulangan utama maupun sisi (*sidebar*) dan permukaan tulangan seengkang dengan tingkat presentase korosi sebesar 0% hingga 50%. Korosi seragam adalah tipe korosi dimana daerah anoda dan kathoda berada pada posisi yang sama (Zhao et al., 2011). Spesifikasi benda uji balok dapat dilihat pada Gambar 1, Gambar 2, dan Tabel 1. Tahapan pelaksanaan penelitian perilaku lentur pada struktur balok beton bertulang akibat baja tulangan terkorosi menggunakan *software Response-2000* dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pemodelan yang dilakukan pada program ini dibatasi

menggunakan asumsi pengurangan luas penampang volume tulangan baja. Contoh perhitungan tingkat persentase korosi 5% artinya telah terjadi pengurangan luas penampang tulangan baja sebesar 5%. Jenis penampang balok yang digunakan dalam penelitian ini yaitu penampang balok berbentuk persegi yang memiliki ukuran bervariasi dan memiliki panjang bentang seragam. Desain komposisi tulangan yang digunakan bervariasi yaitu meliputi diameter, jarak, dan variasi tingkat korosi pada tulangan utama, tulangan sisi, maupun tulangan geser. Analisis pembebanan dilakukan dengan berpedoman pada PPPURG 1989, SNI-03-2847-2002, SNI-2052-2017, SNI-2847-2019 dan SNI-1727-2013 untuk mengetahui besarnya momen nominal (M_u). Analisis dan permodelan penampang balok menggunakan program *Response-2000* dengan memasukkan data dan spesifikasi penampang balok yang meliputi dimensi, jarak tulangan lentur dan tulangan geser, panjang bentang balok, diameter tulangan akibat korosi, mutu beton, dan mutu tulangan baja, dan memasukkan data beban yang berupa (*axial*, *moment*, dan *shear force*). Kemudian dilakukan proses *running* permodelan. Hasil *running Response-2000* berupa data grafik dan gambar hasil analisis perilaku balok.



Gambar 1. Penulangan balok uji B1 pada daerah tumpuan



Gambar 2. Penulangan balok uji B1 pada daerah lapangan

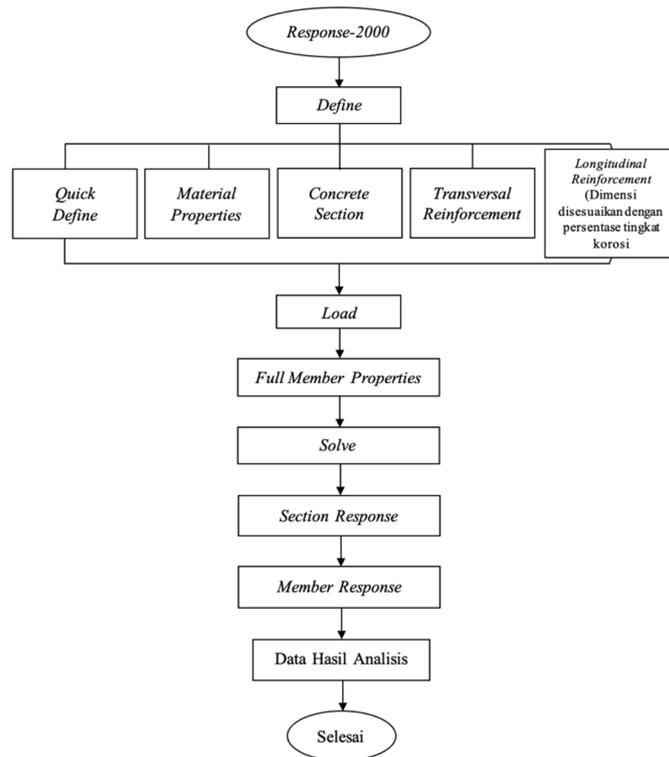
Tabel 1. Spesifikasi benda uji

Daerah	Tulangan utama	Tulangan sisi	Tulangan geser
Tumpuan	8D25-4D25	4D16	3D10-75
Lapangan	4D25-6D25	4D16	2D10-150

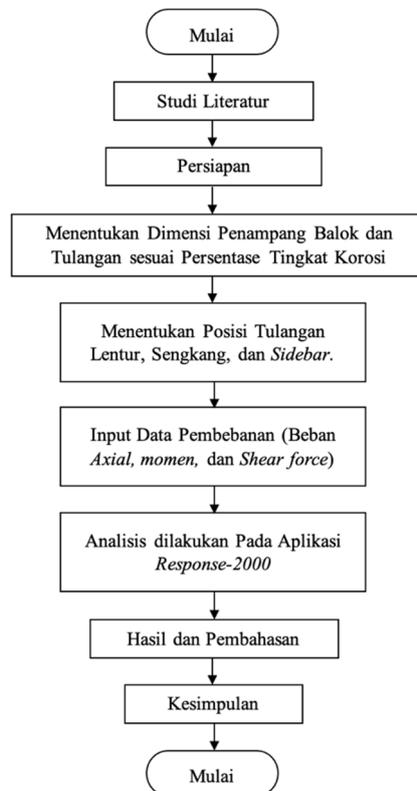
Spesifikasi mutu material baja tulangan dalam penelitian ini mengacu pada standar mutu SNI-2052-2017 baja tulangan beton dan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi mutu material baja tulangan

Jenis Tulangan	Kuat leleh (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
Utama dan sisi	420	525
Geser	280	350



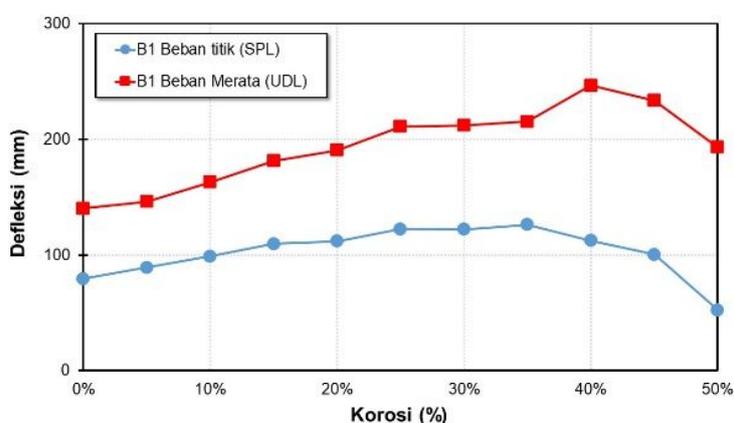
Gambar 3. Bagan alir metode pelaksanaan penelitian



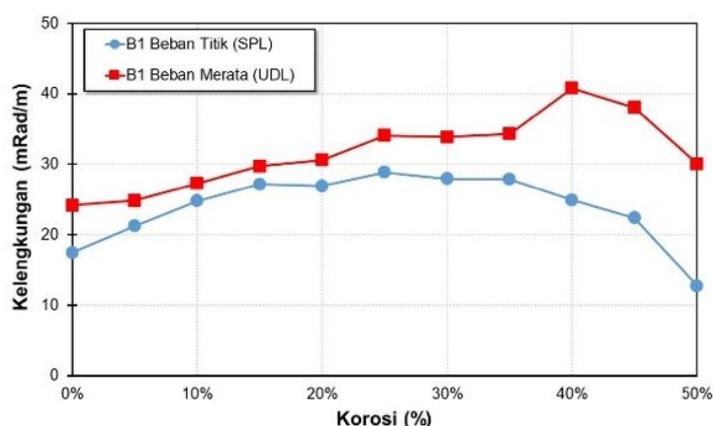
Gambar 4. Bagan alir analisis menggunakan Response-2000

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan bentuk pada elemen struktur balok yang diakibatkan oleh adanya beban vertikal (beban titik maupun beban merata) pada arah sumbu y mengakibatkan balok mengalami lendutan atau defleksi. Hasil analisis pada Gambar 5 bahwa ditunjukkan nilai kelengkungan balok nilai lendutan terbesar pada balok lapangan terjadi pada tingkat korosi baja tulangan sebesar 40% dengan nilai defleksi sebesar 246,50 mm, sedangkan balok yang diberikan beban titik memiliki nilai defleksi terbesar terjadi pada tingkat korosi baja tulangan sebesar 35% dengan nilai defleksi sebesar 126,40 mm. Hal ini disebabkan karena adanya faktor beban yang lebih besar pada beban merata (UDL) sehingga balok mengalami defleksi lebih besar. Selain itu, semakin meningkatnya nilai defleksi balok sangat dipengaruhi oleh tingginya kadar korosi yang terjadi pada baja tulangan, adanya faktor korosi yang semakin tinggi membuat struktur balok mengalami penurunan kekuatan dalam menahan beban yang diberikan, sehingga pada tingkat korosi sebesar 45% hingga 50% balok sudah tidak dapat menahan gaya yang diberikan hingga balok mengalami patah atau fraktur sehingga hasil defleksi pada struktur dengan tingkat korosi melebihi 40% sudah tidak dalam masa layan.



Gambar 5. Hubungan defleksi terhadap rasio tingkat korosi baja tulangan dari analisis pemodelan pada Response2000

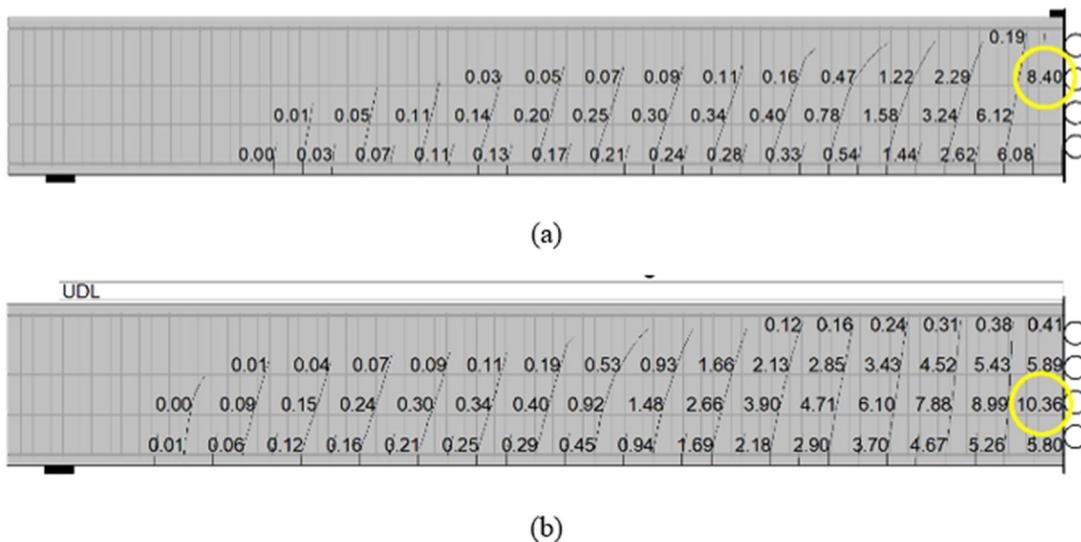


Gambar 6. Hubungan kelengkungan terhadap rasio tingkat korosi baja tulangan dari analisis pemodelan pada Response2000

Nilai kelengkungan terbesar terjadi sebesar 40,76 mRad/m pada tingkat korosi baja tulangan sebesar 40%, sedangkan nilai kelengkungan yang terjadi pada balok yang diberikan faktor

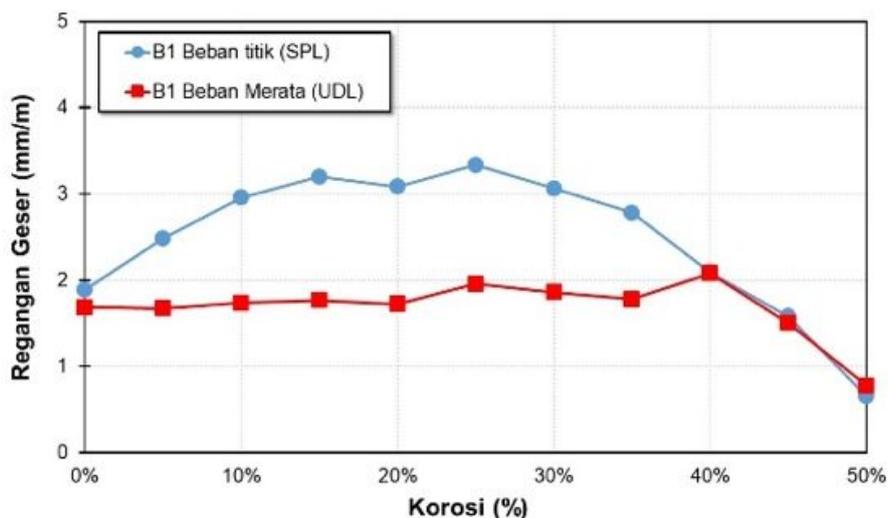
beban berupa beban titik (SPL) dengan kelengkungan terbesar terjadi pada tingkat korosi baja tulangan sebesar 25%, dengan nilai kelengkungan sebesar 28,86 mRad/m. Adanya perbedaan tingkat korosi baja tulangan yang terjadi akibat faktor beban titik pada kelengkungan dan defleksi balok ini disebabkan oleh adanya perbedaan jarak tulangan lentur, sisi (*sidebar*) maupun tulangan sengkang yang diukur dari selimut beton terluar terhadap titik as tulangan yang berbeda. Namun sebaliknya yang terjadi pada faktor beban merata (UDL) nilai kelengkungan dan defleksi terjadi pada titik yang sama yaitu pada tingkat korosi baja tulangan sebesar 40%. Hasil tersebut ditunjukkan dalam Gambar 6.

Adanya beban vertikal yang searah dengan sumbu y mengakibatkan balok mengalami lebar retak (*crack width*) yang terjadi pada daerah tarik maupun daerah tekan. Hasil analisis *Response-2000* menunjukkan adanya faktor beban merata (UDL) yang diberikan, membuat balok mengalami lebar retak maksimum yang terjadi pada tingkat korosi 40% sebesar 10,36 mm. Lebar retak ini pada balok dengan faktor beban merata ini terjadi pada daerah penampang balok daerah tarik. Tingkat korosi yang terjadi pada balok sebanding dengan nilai kelengkungan dan defleksi yaitu korosi pada baja tulangan sebesar 40%. Namun, pada sisi lain adanya pengaruh faktor beban titik (SPL) membuat balok mengalami lebar retak yang berbeda dari balok yang diberikan beban merata (UDL) yang terjadi pada daerah tekan sebesar 8,40 mm pada tingkat korosi baja tulangan sebesar 35% yang dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Pola dan lebar retak hasil analisis (a) akibat beban titik (SPL) dan (b) akibat beban merata (UDL) dari analisis pemodelan pada Response2000

Akibat dari adanya retak, maka perlu ditinjau besarnya regangan geser terbesar yang terjadi pada balok lapangan yang diakibatkan oleh faktor beban titik yaitu sebesar 3,33 mm/m seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Hal ini dikarenakan, pada saat kondisi tersebut baja tulangan sudah mencapai titik leleh maksimum, sehingga pada saat korosi sudah melewati tingkat korosi 25% struktur balok mengalami penurunan maksimum hingga pada akhirnya balok sudah fraktur atau putus. Sedangkan kurva yang dihasilkan dari faktor beban merata mengalami regangan geser terbesar yang terjadi pada tingkat korosi 40% sebesar 2,08 mm/m. Tingkat korosi ini juga terjadi pada defleksi, kelengkungan, lebar retak dan regangan geser.



Gambar 8. Hubungan regangan geser terhadap rasio tingkat korosi baja tulangan dari analisis pemodelan pada Response2000

4. KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

Nilai maksimum dari defleksi, kelengkungan, lebar retak, dan regangan geser yang dihasilkan dari faktor beban merata (uniformly distributed load) terjadi pada tingkat korosi yang sama yaitu 40% karena setelah pada tingkat tersebut struktur telah mengalami penurunan kapasitas.

Nilai lebar retak maksimum terjadi pada tengah bentang dengan nilai 8,4 mm pada tingkat korosi 35% akibat beban titik dan 10,36 mm pada tingkat korosi 40% akibat beban merata.

Nilai regangan geser yang dihasilkan dari faktor beban titik (SPL) lebih besar daripada faktor beban merata, yang disebabkan oleh adanya jarak as antar tulangan terhadap selimut beton terluar yang tidak sama.

Lendutan yang terjadi pada tingkat korosi lebih dari 40% (termasuk 50%) menjadi lebih kecil akibat telah terlampauinya tegangan leleh pada baja akibat pengurangan luas penampang tulangan yang tereduksi oleh tingkat korosi sesuai asumsi tingkat korosi pada penelitian ini adalah dengan adanya pengurangan dimensi sesuai persentase tingkat korosi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada saudara Wingky Sandi Pratama yang telah membantu pelaksanaan analisis data pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Afriansya, R., Astuti, P., Ratnadewati, V. S., Randisyah, J., Ramadhona, T. Y., & Anisa, E. A. (2021). Investigation Of Setting Time And Flowability Of Geopolymer Mortar Using Local Industry And Agriculture Waste As Precursor In Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 21(87). <https://doi.org/10.21660/2021.87.j2325>

- Astuti, P., Kamarulzaman, K., & Hamada, H. (2021). Non-Destructive Investigation of A 44-Year-Old RC Structure Exposed to Actual Marine Tidal Environments Using Electrochemical Methods. *International Journal of Integrated Engineering*, 13(3). <https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.03.018>
- Astuti, P., Kamarulzaman, K., Rafdinal, R. S., Hamada, H., Sagawa, Y., & Yamamoto, D. (2020). Influence of Rust Removal Process on The Effectiveness of Sacrificial Anode Cathodic Protection in Repair Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 849(1), 012088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/849/1/012088>
- Astuti, P., Rafdinal, R. S., Hamada, H., Sagawa, Y., Yamamoto, D., & Kamarulzaman, K. (2019). Effectiveness of Rusted and Non-Rusted Reinforcing Bar Protected by Sacrificial Anode Cathodic Protection in Repaired Patch Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 366(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/366/1/012013>
- Astuti, P., Rafdinal, R. S., Mahasiripan, A., Hamada, H., Sagawa, Y., & Yamamoto, D. (2018). Potential Development Of Sacrificial Anode Cathodic Protection Applied For Severely Damaged Rc Beams Aged 44 Years. *Thailand Concrete Association*, 24–31.
- el Maaddawy, T., & Soudki, K. (2007). A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.004>
- Khan, M. U., Ahmad, S., & Al-Gahtani, H. J. (2017). Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete: An Overview on Chloride Diffusion and Prediction of Corrosion Initiation Time. *International Journal of Corrosion*, 2017, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/5819202>
- Polder, R. B., Leegwater, G., Worm, D., & Courage, W. (2014). Service life and life cycle cost modelling of cathodic protection systems for concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 47, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.004>
- Poupard, O., L'Hostis, V., Catinaud, S., & Petre-Lazar, I. (2006). Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 504–520. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.004>
- Steffens, A., Dinkler, D., & Ahrens, H. (2002). Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 32(6), 935–941. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00728-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00728-7)
- Yuan, Y., & Ji, Y. (2009). Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2461–2466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.026>
- Zhang, X., Zhang, Y., Liu, B., Liu, B., Wu, W., & Yang, C. (2021). Corrosion-induced spalling of concrete cover and its effects on shear strength of RC beams. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105538. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105538>
- Zhao, Y., Karimi, A. R., Wong, H. S., Hu, B., Buenfeld, N. R., & Jin, W. (2011). Comparison of uniform and non-uniform corrosion induced damage in reinforced concrete based on a Gaussian description of the corrosion layer. *Corrosion Science*, 53(9), 2803–2814. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.05.017>