

PENGARUH TULANGAN TERKOROSI PADA DEFLEKSI, KELENGKUNGAN, LEBAR RETAK DAN POLA RETAK BALOK BETON BERTULANG

Pinta Astuti^{1,*}, Wingky Sandi Pratama^{1,2}

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 55183, Indonesia

²PT Samagata Triptayasa, Bogor Raya Residence, 16155, Indonesia

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

Abstract: Corrosion of concrete reinforcing steel is the most detrimental type of damage to infrastructure which is characterized by a decrease in material quality and structural capacity. Corrosion itself is an electrochemical process that occurs due to the intrusion of chloride ions and carbon dioxide gas on the concrete cover. The purpose of this study was to determine the flexural characteristics of reinforced concrete beams by modeling the corrosion of steel reinforcement. The object in this study is a beam with a cross-sectional dimension of 400 mm x 700 mm with a span length of 7200 mm. Beam modeling was carried out using the Response-2000 program. The steel reinforcement is modeled to experience uniform corrosion by reducing the cross-sectional area. There are two kinds of loading, namely point load and uniform load, based on SNI 2847 2019. The quality of the concrete is 30 MPa, while the yield strength of longitudinal reinforcement and stirrups are 525 MPa and 350 MPa, respectively. The results obtained are the relationship between the corrosion level of steel reinforcement and the bending characteristics of the beam, including deflection, moment-curvature, crack width, and crack pattern.

Keywords: beam, flexural characteristic, uniform corrosion, Response-2000

Abstrak: Korosi pada baja tulangan beton menjadi jenis kerusakan yang paling merugikan pada infrastruktur yang ditandai dengan penurunan kualitas material dan kapasitas struktur. Korosi sendiri merupakan suatu proses elektro kimia yang terjadi akibat intrusi ion klorida dan gas karbondioksida pada selimut beton. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik lentur balok beton bertulang dengan pemodelan korosi tulangan baja. Objek dalam penelitian ini adalah sebuah balok dengan dimensi penampang 400 mm x 700 mm dengan panjang bentang 7200 mm. Pemodelan balok dilakukan dengan program Response-2000. Tulangan baja dimodelkan mengalami korosi seragam dengan mengurangi luas penampang. Pembebanan yang diberikan terdapat dua macam yaitu beban titik dan beban merata berdasarkan SNI 2847 2019. Mutu beton adalah 30 MPa sedangkan kuat leleh tulangan memanjang dan sengkang berturut-turut adalah 525 MPa dan 350 MPa. Hasil yang didapatkan berupa hubungan antara level korosi tulangan baja terhadap karakteristik lentur balok meliputi defleksi, kelengkungan, lebar retak dan pola retak.

Kata kunci: balok, karakteristik lentur, korosi seragam, Response-2000

PENDAHULUAN

Balok beton bertulang merupakan salah satu elemen struktur bangunan yang memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas dan fungsionalitas bangunan gedung (Bertolini et al., 2013; Khan et al., 2017; Liao et al., 2023; Russo et al., 2022). Hal ini karena beton merupakan material populer dalam dunia konstruksi di dunia (Anisa et al., 2021; Astuti, Afriansya, et al., 2022; Astuti et al., 2023; Astuti, Rafdinal, et al., 2022; Saha & Amanat, 2021; Steffens et al., 2002).

Sebagian besar balok beton yang telah memasuki masa layan lebih dari 20 tahun mulai mengalami beberapa jenis kerusakan, khususnya apabila ditambah dengan paparan lingkungan yang agresif seperti wilayah pesisir yang memiliki kandungan ion klorida yang tinggi sehingga terakumulasi dalam selimut beton (Yin et al., 2023; Yokota et al., 1999; K. Zhang et al., 2019). Jenis-jenis kerusakan yang timbul dapat berupa retak-retak (*cracks*), pengelupasan (*spalling*), korosi, dan keruntuhan (*collaps*) (El Maaddawy & Soudki, 2007; Peng et al., 2022; Su et al.,

2019; K. Zhang et al., 2019; X. Zhang et al., 2021).

Beberapa metode pencegahan kerusakan telah diupayakan oleh para peneliti terdahulu meliputi mitigasi dari sisi material beton, pencegahan korosi pada tulangan menggunakan metode *coating*, dan proteksi korosi menggunakan proteksi katodik (Astuti et al., 2023; Bertolini et al., 2013; British Standards Institute, 2016; Carmona et al., 2015; Caronge et al., 2015a, 2015b; Cheung & Cao, 2013; Glass et al., 2008; Hu et al., 2022; Jeong et al., 2012; Pedefferri, 1996; Selvaraj et al., 2009; Y. Zhang et al., 2022; Zhu et al., 2020).

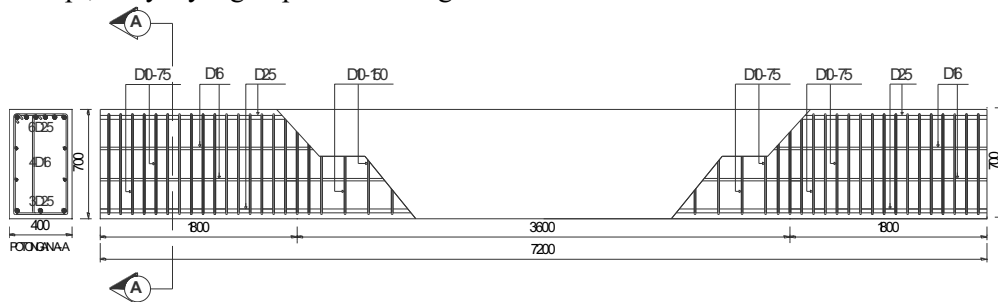
Untuk merencanakan metode pencegahan atau proteksi korosi yang akurat, diperlukan karakteristik lentur detail pada balok yang telah terkorosi. Simulasi untuk mengetahui sifat karakteristik biasanya dilakukan dengan melakukan pengujian laboratorium. Akan tetapi, biaya yang diperlukan sangat

besar. Selain itu, apabila dilihat dari penelitian-penelitian terdahulu juga sangat jarang yang menampilkan hasil parameter lentur balok akibat korosi baik secara pengujian laboratorium maupun melalui analisis numeris. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan simulasi numeris hasil pengaruh tingkat korosi tulangan baja pada balok terhadap defleksi, kelengkungan, lebar retak dan pola retak.

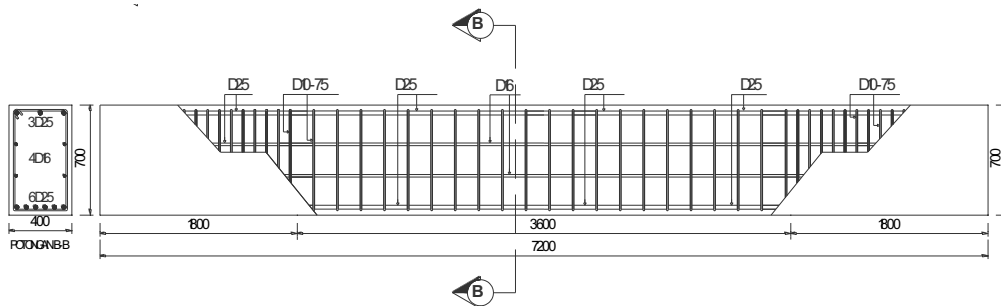
METODE PENELITIAN

Data Balok

Balok yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dimensi penampang 400 mm x 700 mm dengan panjang bentang 7200 mm. Tebal selimut beton dan jarak antar tulangan geser pada daerah tumpuan yaitu 75 mm dan jarak 150 mm pada daerah lapangan. Adapun detail benda uji ditampilkan dalam Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Detail balok pada daerah tumpuan



Gambar 2. Detail balok pada daerah lapangan

Baja Tulangan pada Balok

SNI 2052:2017 diacu untuk menentukan jika kualitas baja tulangan yang digunakan dalam penelitian ini telah sesuai. Adapun detail tulangan pada balok dan mutu baja ditunjukkan secara berturut-turut dalam Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Diameter dan jumlah tulangan

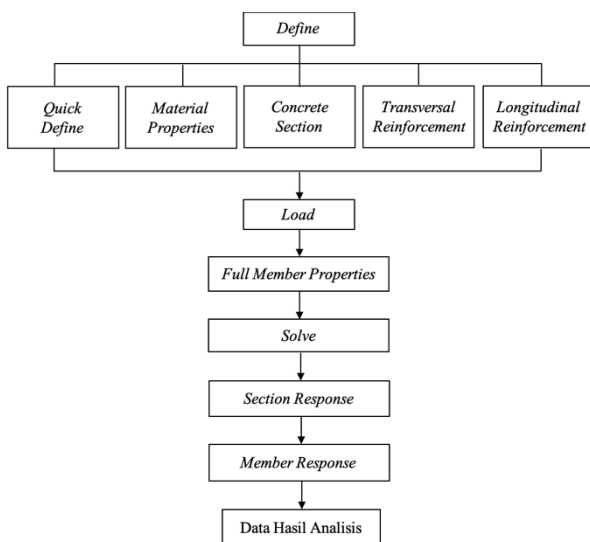
Bagian	Tulangan utama	Tulangan sisi	Tulangan geser
Tumpuan	6D25-3D25	4D16	3D10-75
Lapangan	3D25-6D25	4D16	2D10-150

Tabel 2. Mutu baja tulangan

Jenis	Kuat Leleh (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
Tulangan utama	420	525
Tulangan sisi dan geser	280	360

Proses pemodelan dalam Response-2000

Analisis pembebanan dilakukan sebelum pemodelan menggunakan Response-2000 dan berpedoman pada PPPURG 1987, 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. Adapun diagram alir analisis menggunakan program Response-2000 ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir analisis dalam Response-2000

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis penampang pada program Response-2000 dapat mensimulasikan karakteristik

lentur balok seperti defleksi, kelengkungan, pola retak dan pola retak. Adapun detail hasil dalam penelitian ini dipaparkan pada Sub-Bab 4.1-4.4. Dua macam variasi pembebanan diterapkan yaitu beban titik dan beban merata di atas bentang balok. Balok juga dianalisis pada daerah tumpuan dan daerah lapangan.

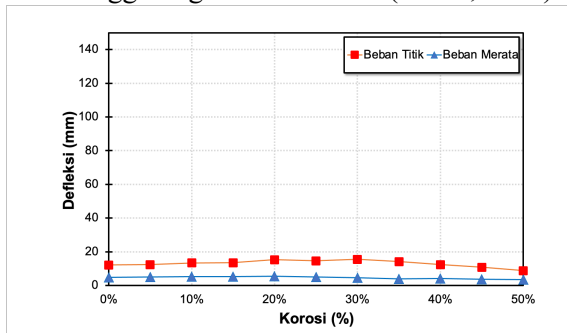
Defleksi

Penelitian tentang defleksi telah dilakukan lebih dari 50 tahun oleh para ilmuwan dan didapatkan hasil dari analisis bahwa defleksi ini memberikan batasan tegangan beton maksimum adalah 45% dari kuat tekannya dan pada tegangan baja tulangan adalah 50% dari kuat lelehnya (Sahusilawane & Frans, 2022). Biasanya struktur balok beton bertulang menggunakan tulangan sengkang yang dipasang secara tegak lurus terhadap sumbu utama balok dan tulangan longitudinal untuk meningkatkan kapasitas geser penampang balok yang relatif rendah jika tanpa tulangan. Modifikasi penulangan pada balok tersebut dapat meningkatkan kapasitas geser dan lentur serta mengurangi besarnya defleksi yang terjadi pada balok. Akan tetapi, selama masa layan konstruksi dapat terjadi perubahan elektrokimiawi pada tulangan baja akibat berinteraksi dengan ion klorida atau molekul karbon dioksida yang dapat menyebabkan korosi. Korosi tersebut dapat menyebabkan berkurangnya luas penampang tulangan yang dapat menyebabkan penurunan pada kapasitas geser dan lentur serta peningkatan defleksi struktur balok (Andrade & Alonso, 2004; Gulikers, 2005; Naderi et al., 2022).

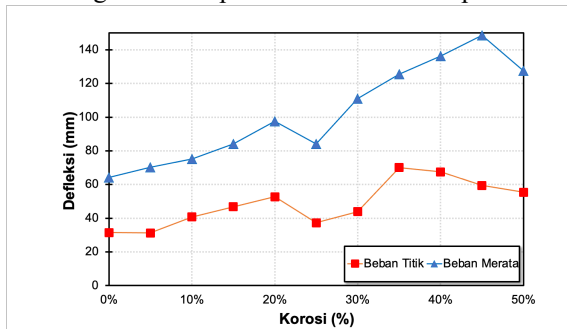
Adapun hasil analisis defleksi terhadap tingkat korosi baja tulangan pada penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 4 dan Gambar 5. Dari hasil tersebut didapatkan bahwa defleksi yang terjadi pada daerah lapangan jauh lebih besar dibandingkan daerah tumpuan karena beban akan terdistribusi lebih ke daerah lapangan yang diindikasikan dari besarnya momen lentur di daerah tersebut. Jenis beban juga mempengaruhi besarnya defleksi yang terjadi. Beban merata menyebabkan defleksi yang lebih tinggi dibandingkan beban titik pada tengah bentang balok.

Dari Gambar 4 dan Gambar 5 juga dapat diketahui bahwa pada tingkat korosi 20%, defleksi mengalami puncak yaitu 100 mm akibat beban merata dan 47 mm akibat beban titik. Setelah itu, defleksi Nampak mengalami penurunan pada level korosi 25% yang

disebabkan oleh timbulnya retak yang dapat menimbulkan konsentrasi tegangan sehingga defleksi yang terukur seolah-olah turun kemudian dilanjutkan trend peningkatan defleksi pada tingkat korosi yang lebih tinggi. Terjadi perbedaan trend apabila balok beton yang diuji memiliki panjang bentang berbeda, penelitian terdahulu menyatakan bahwa pada bentang balok 10.200 mm dan luas penampang 400 mm x 800 mm menunjukkan peningkatan kapasitas hingga dapat menahan defleksi maksimum pertama hingga tingkat korosi 40% (Astuti, 2023).



Gambar 4. Grafik hubungan antara defleksi dan tingkat korosi pada balok daerah tumpuan



Gambar 5. Grafik hubungan antara defleksi dan tingkat korosi pada balok daerah lapangan

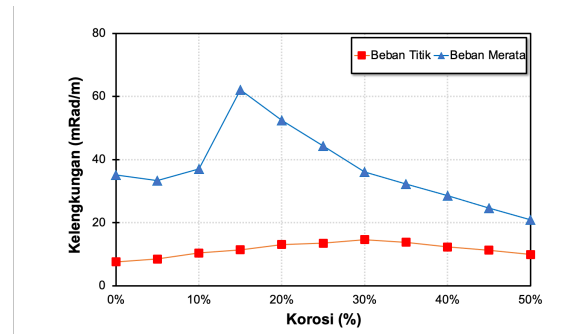
Kelengkungan

Kelengkungan terjadi akibat adanya beban yang bekerja pada struktur balok, sehingga balok tersebut akan mengalami perubahan bentuk menjadi melengkung. Regangan dan tegangan yang terjadi pada struktur balok akan berbanding lurus dengan kelengkungan (*curvature*) terhadap kurva defleksi (*deflection*). Kelengkungan akan bernilai positif jika struktur balok melengkung ke bawah, dan sebaliknya kelengkungan akan bernilai negatif jika struktur balok melengkung ke atas (Harsoyo et al., 2022). Adapun nilai kelengkungan terhadap tingkat korosi pada penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 6 dan Gambar 7.

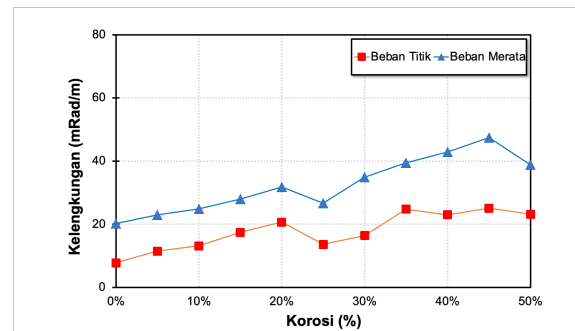
Trend kelengkungan pada daerah tumpuan yang diakibatkan oleh beban merata mencapai

maksimum pada tingkat korosi 15%, sehingga pada tingkat korosi 20% sudah mengalami penurunan. Akan tetapi, kelengkungan pada beban titik cenderung memiliki trend kenaikan hingga 30% diikuti penurunan yang tidak signifikan.

Pada daerah lapangan, nilai kelengkungan memiliki trend yang sama dengan trend defleksi yang terjadi dan telah dijelaskan pada Sub-Bab 4.1.



Gambar 6. Grafik hubungan antara kelengkungan dan tingkat korosi pada balok daerah tumpuan



Gambar 7. Grafik hubungan antara defleksi dan tingkat korosi pada balok daerah lapangan

Pola retak dan lebar retak

Retak yang muncul pada struktur beton bertulang sangat berpengaruh pada *serviceability* dan durabilitas struktur. Adanya rongga dapat memudahkan intrusi ion klorida dan molekul karbon dioksida sehingga akan mempercepat terjadinya korosi (*chloride induced corrosion* dan *carbonation induced corrosion*).

Terdapat beberapa jenis retak, antara lain sebagai berikut. Retak lentur murni (*flexural crack*), pola retak ini terjadi pada daerah yang memiliki nilai momen lentur yang terbesar. Arah pola retaknya hampir tegak lurus terhadap sumbu balok. Retak miring (*flexural shear crack*), pola retak tipe ini terjadi pada bagian balok yang sebelumnya mengalami retak lentur, yang disebabkan oleh perambatan retak miring dari retak yang sudah terjadi sebelumnya. Retak

- Unand), 19(1), 14. <https://doi.org/10.25077/jrs.19.1.14-21.2023>
- Astuti, P., Afriansya, R., Anisa, E. A., & Randisyah, J. (2022). *Mechanical properties of self-compacting geopolymers concrete utilizing fly ash*. 020028. <https://doi.org/10.1063/5.0094463>
- Astuti, P., Rafdinal, R. S., Yamamoto, D., Andriamisaharimanana, V., & Hamada, H. (2022). Effective Use of Sacrificial Zinc Anode as a Suitable Repair Method for Severely Damaged RC Members Due to Chloride Attack. *Civil Engineering Journal*, 8(7), 1535–1548. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-07-015>
- Astuti, P., Rafdinal, R. S., Yamamoto, D., & Hamada, H. (2023). *Corrosion rate of deteriorated steel bar protected by sacrificial anode cathodic protection*. 050010. <https://doi.org/10.1063/5.0110419>
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. B. (2013). *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley VCH.
- British Standards Institute. (2016). *ISO EN 12696 - Cathodic protection of steel in concrete*. British Standards Institute.
- Carmona, J., Garcés, P., & Climent, M. A. (2015). Efficiency of a conductive cement-based anodic system for the application of cathodic protection, cathodic prevention and electrochemical chloride extraction to control corrosion in reinforced concrete structures. *Corrosion Science*, 96, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.04.012>
- Caronge, M. A., Hamada, H., Irmawaty, R., Sagawa, Y., & Yamamoto, D. (2015a). Application of Sacrificial Point Anode for Prevention of Steel Corrosion in Cracked Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(10), 479–488. <https://doi.org/10.3151/jact.13.479>
- Caronge, M. A., Hamada, H., Irmawaty, R., Sagawa, Y., & Yamamoto, D. (2015b). Application of Sacrificial Point Anode for Prevention of Steel Corrosion in Cracked Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(10), 479–488. <https://doi.org/10.3151/jact.13.479>
- Cheung, M. M. S., & Cao, C. (2013). Application of cathodic protection for controlling macrocell corrosion in chloride contaminated RC structures. *Construction and Building Materials*, 45, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.010>
- 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>
- Glass, G. K., Roberts, A. C., & Davison, N. (2008). Hybrid corrosion protection of chloride-contaminated concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 161(4), 163–172. <https://doi.org/10.1680/coma.2008.161.4.163>
- Gulikers, J. (2005). Theoretical considerations on the supposed linear relationship between concrete resistivity and corrosion rate of steel reinforcement. *Materials and Corrosion*, 56(6), 393–403. <https://doi.org/10.1002/maco.200403841>
- Harsoyo, Y. A., Saifunuha, A. H., Wibowo, M. A., & Dwi Hatmoko, J. U. (2022). BEBAN MAKSIMUM, TEGANGAN, LENDUTAN DAN MOMEN CURVATUR PADA VARIASI JEMBATAN BETON BALOK T DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE RESPONSE 2000. *Konstruksia*, 13(1), 113. <https://doi.org/10.24853/jk.13.1.113-127>
- Hu, J. Y., Zhang, S. S., Chen, E., & Li, W. G. (2022). A review on corrosion detection and protection of existing reinforced concrete (RC) structures. *Construction and Building Materials*, 325, 126718. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126718>
- Jeong, J.-A., Jin, C.-K., & Chung, W.-S. (2012). Tidal Water Effect on the Hybrid Cathodic Protection Systems for Marine Concrete Structures. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(12), 389–394. <https://doi.org/10.3151/jact.10.389>
- 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>
- Liao, J. J., Zeng, J. J., Quach, W. M., & Zhou, J. K. (2023). Axial compressive behavior and model assessment of FRP-confined

- seawater sea-sand concrete-filled stainless steel tubular stub columns. *Composite Structures*, 311, 116782. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.116782>
- Naderi, R., Bautista, A., Velasco, F., Soleimani, M., & Pourfath, M. (2022). Green corrosion inhibition for carbon steel reinforcement in chloride-polluted simulated concrete pore solution using *Urtica Dioica* extract. *Journal of Building Engineering*, 58, 105055. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105055>
- Pedefferri, P. (1996). Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials*, 10(5), 391–402. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00017-8](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00017-8)
- Peng, L., Zeng, W., Zhao, Y., Li, L., Poon, C. sun, & Zheng, H. (2022). Steel corrosion and corrosion-induced cracking in reinforced concrete with carbonated recycled aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104694. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2022.104694>
- Russo, N., Gastaldi, M., Schiavi, L., Strini, A., & Lollini, F. (2022). Chloride penetration resistance in sound and micro-cracked concretes through different experimental techniques. *Construction and Building Materials*, 343, 128098. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128098>
- Saha, A. S., & Amanat, K. M. (2021). Rebound hammer test to predict in-situ strength of concrete using recycled concrete aggregates, brick chips and stone chips. *Construction and Building Materials*, 268, 121088. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121088>
- Sahusilawane, T., & Frans, P. L. (2022). PERILAKU DEFLEKSI BALOK BETON TULANGAN SISTEM RANGKA DENGAN JARAK SPASI SEPERDUA TINGGI EFEKTIF BALOK. *JURNAL SIMETRIK*, 12(1), 520–525. <https://doi.org/10.31959/js.v12i1.1066>
- Selvaraj, R., Selvaraj, M., & Iyer, S. V. K. (2009). Studies on the evaluation of the performance of organic coatings used for the prevention of corrosion of steel rebars in concrete structures. *Progress in Organic Coatings*, 64(4), 454–459. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2008.08.005>
- 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)
- Su, M., Wei, L., Zhu, J.-H., Ueda, T., Guo, G., & Xing, F. (2019). Combined Impressed Current Cathodic Protection and FRCM Strengthening for Corrosion-Prone Concrete Structures. *Journal of Composites for Construction*, 23(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000949](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000949)
- Yin, S., Liu, Z., Huang, Z., & Dong, P. (2023). Degradation of bond strength and deformation between TRC-confined seawater sand concrete and BFRP bars under chloride corrosion environment. *Marine Structures*, 87, 103313. <https://doi.org/10.1016/J.MARSTRUC.2022.103313>
- Yokota, H., Akiyama, T., Hamada, H., Mikami, A., & Fukute, T. (1999). *Effect of degradation of concrete on mechanical properties of reinforced concrete beams exposed to marine environment (for 20 years in Sakata)*.
- Zhang, K., Li, W., & Han, F. (2019). Performance deterioration mechanism and improvement techniques of asphalt mixture in salty and humid environment. *Construction and Building Materials*, 208, 749–757. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.061>
- 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>
- Zhang, Y., Qiang, Y., Ren, H., Cao, J., Cui, L., Zong, Z., Chen, D., & Xiang, T. (2022). Inhibitor loaded functional HNTs modified coatings towards corrosion protection in reinforced concrete environment. *Progress in Organic Coatings*, 170, 106971. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2022.106971>
- Zhu, J.-H., Wang, Z., Su, M., Ueda, T., & Xing, F. (2020). C-FRCM Jacket Confinement for RC Columns under Impressed Current Cathodic Protection. *Journal of Composites for Construction*, 24(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001006](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001006)