

PEMODELAN PENURUNAN KAPASITAS KOLOM GEDUNG AKIBAT KOROSI SERAGAM (*UNIFORM CORROSION*) PADA TULANGAN BAJA

Pinta Astuti*

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul, DI Yogyakarta, 55183

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

Abstract: Corrosion is one type of damage that occurs in reinforced concrete structures. The reaction of corrosion is formed by releasing Fe atoms in reinforcement into Fe^{2+} or Fe^{3+} ions. The mechanism of corrosion is caused by chloride ions and carbonation. The corrosion used in this research is uniform corrosion, which is simulated by reducing the cross section of the reinforcement to describe the degree of corrosion. This research models six column types, two case studies, and four additional load types. The design of concrete structures uses structural analysis programs (SAP2000) to analyze the internal forces of structure and then it integrates with the SPColumn program to determine the column behavior if the corroded reinforcement is embedded in the structures during its service life. Based on the analytical test result done by SPColumn, columns C1, C2, and C3 are able to withstand structural loads up to a corrosion level of 20%, while C4-1, C4-2, and C5 are capable of up to a corrosion level of 45%. The nominal flexural strength and moment capacity decreased by up to 36% in column C4-2 with 0% loading and a corrosion rate of up to 45%. The results of the interaction diagrams of the two case studies show that all columns are able to withstand up to a 50% corrosion rate. Then, it concluded that corroded column structures will affect the results of the interaction diagram. Corrosion damage will cause the performance of concrete buildings to decrease, and if the damage continues, the buildings will no longer be suitable for use.

Keywords: uniform corrosion, SAP2000, SPColumn, interaction diagram

Abstrak: Korosi adalah salah satu kerusakan yang terjadi pada struktur beton bertulang. Reaksi pada korosi terjadi akibat perubahan atom Fe dalam tulangan menjadi ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} . Mekanisme korosi disebabkan oleh ion klorida dan karbonasi. Korosi yang digunakan di pengujian ini menggunakan korosi seragam yang disimulasikan dengan pengurangan penampang dari tulangan untuk menggambarkan tingkat korosi struktur kolom yang mengalami korosi akan mempengaruhi hasil diagram interaksi kolom. Kerusakan korosi akan menyebabkan kinerja bangunan beton menurun, dan jika kerusakan berlanjut, maka bangunan beton sudah tidak layak pakai. Cara mengatasi korosi dengan inhibitor korosi yaitu menambahkan elemen kimia ke lingkungan baja untuk mengurangi laju korosi. Pengujian ini menggunakan 6 jenis kolom 2 studi kasus, dan 4 penambahan beban. Desain struktur beton menggunakan program bantuan seperti SAP2000 untuk menganalisis gaya yang membebani struktur kemudian diintegrasikan dengan program SPColumn untuk mengetahui tulangan yang mengalami korosi mampu menahan beban dari struktur bangunan. Dari hasil analisis SPColumn didapatkan kolom C1, C2, dan C3 mampu menahan beban struktur hingga tingkat korosi 20%, sedangkan C4-1, C4-2, dan C5 mampu sampai tingkat korosi 45%. Nilai kuat lentur nominal dan kapasitas momen mengalami penurunan hingga 36% pada kolom C4-2 dengan pembebanan 0% dan tingkat korosi sampai 45%. Nilai regangan tarik baja meningkat hingga 21% pada kolom C4-2 dengan pembebanan 0% dan tingkat korosi sampai 45%. Hasil diagram interaksi dari kedua studi kasus, semua kolom mampu menahan hingga 50% tingkat korosi.

Kata kunci: korosi seragam, SAP2000, SPColumn, diagram interaksi

PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu bahan struktur yang penting dalam struktur bangunan karena beton bisa tahan lama, tahan terhadap api dan bahan

dari pembuatan beton sangat mudah didapatkan. Penggunaan beton yang sangat penting sehingga inovasi beton sangatlah dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan dan meningkatkan kualitas dan mutu beton. Beton membutuhkan bahan

pengisi (*filler*) harus memiliki sifat yang mudah diolah (*workability*), keawetan (*durability*) dan kekuatan (*strength*), dari bahan pengisi/tambahan diharapkan akan meningkatkan kualitas dari beton. Menurut Wonlele, dkk. (2013) beton memiliki kemampuan yang tinggi dengan kemampuan menahan api dan gempa bumi pada bangunan. Tetapi beton juga memiliki kekurangan yaitu kekuatan tarik yang kecil sehingga beton membutuhkan tulangan untuk menahan gaya tarik untuk memikul beban-beban yang bekerja.

Menurut Soenaryo, dkk. (2012), kolom adalah batang kompresi vertikal dari rangka struktural yang menerima beban dari balok. Kolom meneruskan beban dari ketinggian dari atas ke bawah hingga akhirnya sampai di tanah melalui fondasi. Karena kolomnya adalah komponen yang menerima tekanan maka untuk keruntuhan di satu kolom disebut lokasi kritis atau *collapse* atau runtuhnya di lantai tersebut, sedangkan untuk keruntuhan batas total adalah *ultimit total collapse* yang mana runtuhnya seluruh lantai.

Beberapa kerusakan pada beton bertulang, seperti korosi, retak dan berlubang. Kerusakan korosi yang disebabkan oleh proses kimiawi yang terjadi di baja tulangan, sehingga menyebabkan durabilitas beton menurun. Korosi terjadi di beton yang telah retak sehingga baja tulangan terkontaminasi ion Cl^- dan O^2 . Beton yang telah terkontaminasi akan merubah ukuran dari tulangan baja menjadi lebih kecil dan mengakibatkan kualitas beton menurun. Kasus seperti ini sangat sering dijumpai di Indonesia dikarenakan air yang digunakan untuk pencampuran agregat tidak lah bersih sehingga ion yang ada akan mengontaminasi tulangan baja. Menurut Arista, dkk. (2021), penyebab korosi propagasi ialah proses masuknya ion klorida Cl^- yang berdifusi ke dalam lapisan pasif baja yang menyebabkan kualitas beton menurun.

Dari berbagai penelitian terdahulu yang terkait, belum ada referensi yang menunjukkan hasil analisis pemodelan korosi menggunakan integrasi program SAP2000 dan SPColumn untuk mensimulasikan perilaku penampang kolom yang terkorosi. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini dengan menggunakan beberapa jenis kolom yang diambil dari data kolom riil dan pembebanan di lapangan.

TUJUAN PENELITIAN

Adapun tujuan penelitian ini antara lain sebagai berikut.

- Menentukan kemampuan kolom C1, C2, C3, C4-1, C4-2 dan C5 ketika mengalami korosi 0% - 50% dengan beban tambahan 0%, 10%, 20%, 30% pada kedua studi kasus.
- Menentukan nilai kuat lentur nominal dan kapasitas momen dari kolom C1, C2, C3, C4-1, C4-2 dan C5 ketika mengalami korosi 0% - 50% dengan beban tambahan 0%, 10%, 20% dan 30% pada kedua studi kasus.
- Menentukan nilai regangan tarik baja dari kolom C1, C2, C3, C4-1, C4-2 dan C5 dari kedua studi kasus dengan beban tambahan 0%, 10%, 20% dan 30% pada kedua studi kasus.
- Menentukan batas korosi dari diagram interaksi pada kolom C1, C2, C3, C4-1, C4-2 dan C5 ketika mengalami korosi 0% - 50% dengan beban tambahan 0%, 10%, 20% dan 30% pada kedua studi kasus.

TINJAUAN PUSTAKA

Pada konstruksi bangunan beton sering mengalami kerusakan dari berbagai faktor, seperti air yang digunakan pada beton tidak bersih sehingga menyebabkan tulangan mengalami korosi dan rongga udara yang di sebabkan tidak meratanya pematatan pada saat pengecoran. Berikut beberapa katagori kerusakan beton secara umum yaitu:

Cracks adalah salah satu kerusakan yang terjadi secara struktural dan non – structural. Retak struktural bisa terjadi karena kelebihan beban dan kesalahan desain. Retak non – structural terjadi karena proses pencampuran bahan beton yang mengakibatkan tidak langsung mengakibatkan melemahnya struktur. Berikut jenis-jenis retakan yaitu :

- Retak Plastis Akibat Penyusutan
- Drying Shrinkage Cracking*
- Concrete Cracking*
- Thermal Cracking*
- Korosi
- Voids dan Honeycomb*

Korosi menjadi faktor utama penyebab degradasi kekuatan dan kerusakan pada struktur beton bertulang dalam jangka panjang (Astuti dkk, 2021). Dari eksperimen yang telah dilakukan, korosi akibat intrusi ion klorida pada

selimut beton memperparah kondisi kerusakan struktur yang dapat dideteksi menggunakan metode elektro-kimia (Astuti dkk, 2021). Untuk menghentikan laju korosi yang terjadi pada struktur yang telah berumur lebih dari 44 tahun tersebut antara lain dapat diaplikasikan proteksi katodik baik berupa anoda korban (*sacrificial anode*) atau metode *impressed current* (Astuti dkk, 2018; Astuti dkk, 2019; Astuti dkk, 2020).

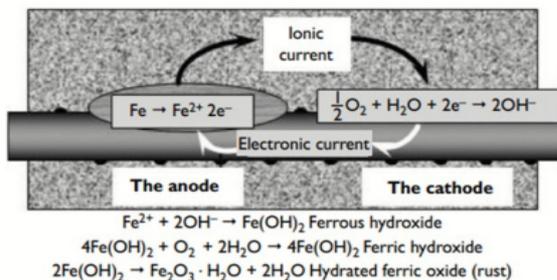
2.1 Mekanisme Korosi

Fonna, dkk. (2018) menjelaskan korosi sebagai fenomena dari kerusakan kualitas baja yang disebabkan oleh interaksi antara baja dengan lingkungan. Fenomena ini terjadi di beberapa negara di dunia, korosi menyebabkan penurunan kemampuan dari beton sehingga beton akan tidak tahan lama atau tidak sesuai ketahanan rencana. Pada beton yang mengalami korosi disebabkan oleh proses karbonisasi dan instruksi ion-ion klorida (Cl^-) sebagai dua faktor utama yang menyebabkan lapisan pasif rusak. Berikut adalah mekanisme korosi :

Proses Anoda : $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

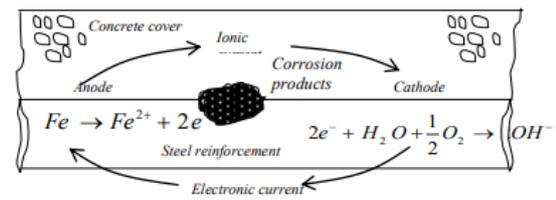
Pada Fe menghasilkan ion $Fe^{2+} +$ elektron, kemudian Fe^{2+} melepaskan elektrolit dan elektron dari anoda ke katoda. Pada katoda mengalami reaksi penambahan elektron dengan bantuan air serta oksigen, sehingga menghasilkan hidroksil. Proses tersebut dijelaskan sebagai berikut.

Proses katoda : $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$



Gambar 1. Proses reaksi korosi pada baja tulangan (Broomfield, 2003)

Siregar, (2006) menjelaskan korosi tulangan adalah proses tereaksinya atom Fe dalam Batangan baja menjadi ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} . Mekanisme korosi yang disebabkan oleh ion klorida dan karbonasi adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Proses terjadinya korosi pada tulangan dalam beton (Siregar, 2006)

Hasil dari reaksi OH^- adalah terbentuknya ion hidroksida meningkatkan alkali beton dan memperkuat lapisan pasif, mengurangi dampak karbonisasi dan ion klorida pada katoda (Broomfield, 1997). Adapun jenis-jenis korosi yang umum terjadi pada tulangan antara lain sebagai berikut:

a. Korosi Seragam (*Uniform Corrosion*)

Karyono, dkk. (2017) menjelaskan korosi seragam adalah serangan korosi yang umum terjadi pada area permukaan material yang luas.

b. Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*)

Karyono, dkk. (2017) menjelaskan korosi sumuran adalah korosi yang terjadi dan terkonsentrasi pada daerah tertentu. Bentuk korosi ini biasanya disebabkan oleh klorida.

c. Korosi Erosi

Pattireuw, dkk. (2013) menjelaskan korosi erosi adalah korosi yang terjadi karena keausan sehingga menghasilkan bagian yang tajam dan kasar, bagian tersebut rentan terhadap korosi dan juga disebabkan oleh cairan yang sangat cepat, dapat menimbulkan korosi pada film pelindung pada logam.

d. Korosi Sambungan Dua Logam (*Galvanic Corrosion*)

Utomo, (2015) menjelaskan korosi ini terjadi ketika dua logam yang berbeda bersentuhan atau terhubung secara listrik, perbedaan potensial akan menyebabkan elektron atau arus mengalir diantara kedua logam tersebut.

e. Korosi Arus Liar

Pattireuw, dkk. (2013) menjelaskan korosi arus liar adalah korosi yang disebabkan oleh masuknya arus regular yang berlawanan dengan arah aliran elektron, besarnya dipengaruhi oleh besarnya arus eksternal. Selain itu, Pattireuw, dkk. (2013) juga menjelaskan laju korosi secara umum dapat diukur dengan dua metode, yaitu metode kehilangan berat dan metode elektrokimia. Metode kehilangan berat adalah menghitung penurunan berat. Ketika baja dicelupkan dalam beberapa waktu. Berikut rumus satuan MPY (miles/year) sebagai berikut.

$$MPY = 534 W/DAT$$

Dengan,

W = berat yang hilang (mg)

D = density benda uji korosi (g/cm^3)

A = luas permukaan (in^2)

T = waktu, *hour* (jam)

Metode elektrokimia adalah suatu metode pengukuran laju korosi dengan cara mengukur beda potensial suatu benda sehingga diperoleh laju korosi. Metode ini mengukur laju korosi hanya selama pengukuran, memungkinkan laju tersebut diperirakan dalam jangka waktu yang lama. Keuntungan dari metode ini adalah kita dapat segea menentukan laju korosi pada saat pengukuran, sehingga waktu pengukuran tidak memakan banyak waktu. Gotami (2020) menjelaskan korosi pada tulangan baja akan menyebabkan diameter tulangan baja mengalami pengecilan, sehingga volume senyawa yang dihasilkan oleh reaksi korosi lebih besar daripada volume tulangan baja reaktif. Ini menciptakan tegangan pada beton disekitar tulangan baja, karena tekanan ekspansi volume komponen yang disebabkan oleh reaksi korosi, tulangan baja dapat retak atau terkelupas.

Sidiq (2013) menjelaskan cara mengatasi korosi dengan menggunakan inhibitor korosi. Inhibitor korosi adalah elemen kimia yang ditambahkan ke lingkungan untuk mengurangi laju korosi lingkungan terhadap logam. Banyaknya inhibitor menghambat korosi dengan cara adsorpsi dan dapat membentuk lapisan tipis yang tidak terlihat dengan ketebalan hanya beberapa molekul, tetapi beberapa terjadi karena pengaruh lingkungan.

Solikin dan Setiawan (2015) menjelaskan kekuatan kolom untuk menahan beban tergantung pada daya dukungnya yaitu gabungan beban aksial (P_u) dan momen (M_u) secara bersamaan. Oleh karena itu, desain kolom suatu struktur gedung didasarkan pada kekuatan dan kekakuan penampang terhadap beban aksial dan momen lentur. Untuk lebih mudah memahami kekuatan penampang kolom, biasanya dibuat diagram interaksi, yaitu diagram batas yang menunjukkan berbagai kombinasi beban aksial dan momen yang dapat ditanggung kolom dengan aman (Wahyudi, 1997). Pada analisis kolom di dasarkan pada:

$$\begin{aligned}\phi M_n &> M_u \\ \phi P_n &> P_u\end{aligned}$$

dimana :

ϕM_n = kekuatan lentur rencana,

M_u = momen lentur terfaktor,

ϕP_n = kekuatan aksial rencana

P_u = beban aksial terfaktor.

Karimah (2017) menjelaskan rasio tulangan adalah rasio luas tulangan baja dengan total luas penampang kolom. Rasio tulangan minimum adalah 1%. Hal ini dilakukan untuk menjaga deformasi berubah-ubah waktu agar momen leleh lebih besar dari momen retak. Rasio tulangan geser tinggi maksimal adalah 6%. Disarankan untuk tidak menggunakan penguatan lebih dari 4% membuat penguatan tidak dimasukkan ke dalam penampang beton, terutama pada sambungan balok-kolom.

2.2 SAP2000

Simatupang, dkk. (2020) menjelaskan Structure Analysis Program 2000 (SAP2000) merupakan salah satu program analisis struktur yang lengkap namun sangat mudah untuk dioperasikan. Prinsip utama penggunaan program ini adalah pemodelan struktur, eksekusi analisis, dan pemeriksaan atau optimasi desain; yang semuanya dilakukan dalam satu langkah atau satu tampilan. Tampilan berupa model secara real time sehingga memudahkan pengguna untuk melakukan pemodelan secara menyeluruh dalam waktu singkat namun dengan hasil yang tepat.

2.3 Pembebanan

Struktur beton bertulang di rancang supaya mampu menahan beban yang diterapkan pada sebuah struktur. Beban didefinisikan sebagai sebuah gaya luar yang membebani sebuah struktur. Beban ini nantinya akan dikombinasikan jika telah dihitung secara cermat. Beberapa pedoman yang mengatur tentang ketentuan pembebanan di Indonesia antara lain sebagai berikut:

1. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI-1726-2019).
2. Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain (SNI-1727-2020)
3. Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPURG, 1987).

Secara umum beban-beban yang dipikul pada struktur meliputi:

- Beban mati

- Beban hidup
- Beban angin
- Beban hujan
- Beban gempa

2.4 Korelasi antara program SAP2000 dengan program SP Column

Output yang dihitung oleh program SAP2000 adalah besarnya gaya, yaitu gaya yang menunjukkan perilaku struktur di bawah beban. Selain itu, hasil perencanaan SAP2000 dapat digunakan sebagai sarana informasi berupa indikator keamanan bangunan yang berupa warna pada setiap elemen struktur. Hasil analisis dari SAP2000 kemudian dievaluasi untuk menentukan apakah ada elemen yang teridentifikasi tidak aman (Astuti, 2015; Astuti, 2016). Jika hal ini terjadi, maka harus dievaluasi lebih lanjut melalui trial and error untuk mengetahui penyebabnya. Setelah itu, besarnya gaya dalam yang didapat

dari SAP2000 berupa gaya aksial, gaya geser, dan momen pada kolom tersebut diaplikasikan pada program SP Column untuk mendapatkan respon spesifik terkait penampang kolom yang sedang dianalisis.

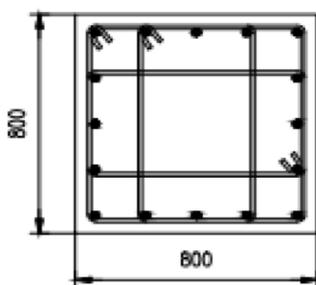
3. Metode Penelitian

3.1 Data Kolom

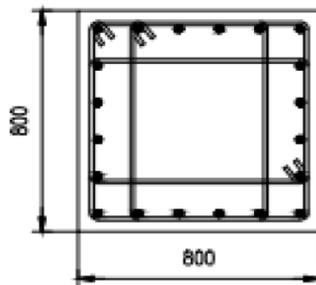
Kolom yang digunakan dalam pengujian ini menggunakan kolom beton bertulang dengan berbagai bentuk seperti persegi, berbentuk L dan berbentuk T seperti yang ditampilkan dalam Gambar 3. Kolom beton bertulang menggunakan mutu beton (f'_c) 30 MPa, dan mutu tulangan utama (Main Bar) dan tulangan Sengkang (*Stirrup*) yaitu (f_y) 420 MPa. Data mutu material ini sangat mempengaruhi hasil analisis perilaku penampang suatu struktur (Anisa, dkk. 2021)

Tabel 1. Dimensi kolom

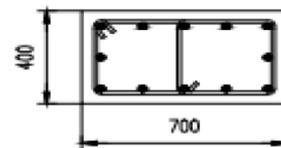
Benda Uji	Kuat Tekan (MPa)	Tebal Selimut (mm)	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tinggi (mm)
C1	30	40	800	800	4,5 & 4,2
C2	30	40	800	800	4,5 & 4,2
C3	30	40	700	400	
C4-1	30	40	1000	1000	4,5 & 4,2
C4-2	30	40	700	700	4,5 & 4,2
C5	30	40	1150	700	4,5 & 4,2



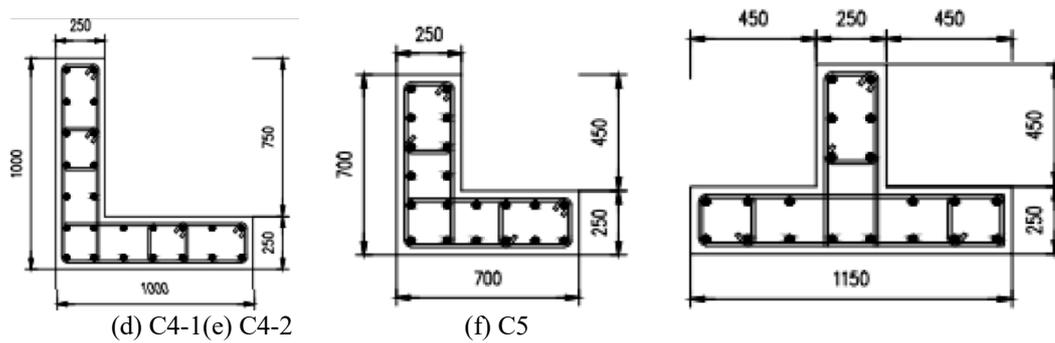
(a) C1



(b) C2



(c) C3



Gambar 3. Penampang kolom yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kolom C1, C2, C3, C4-1, C4-2, dan C5

3.2 Mutu Material Baja pada Kolom

Mutu baja pada benda uji ini mengacu pada peraturan mutu baja SNI 2052:2017 Baja Tulangan Beton. Berdasarkan peraturan SNI 2052:2017 spesifikasi mutu sudah menggunakan standar yang telah di jelaskan pada peraturan, berikut mutu yang digunakan dalam pengujian ini.

Tabel 2. Tulangan kolom

Benda Uji	Diameter Tulangan Utama (Main Bar)	Diameter Sengkang (Stirrup)
C1	16 D25	4 D13 – 100
C2	20 D25	4 D13 – 100
C3	12 D22	3 D13 – 100
C4-1	24 D25	D10 – 100/150
C4-2	20 D25	D10 – 100/150
C5	20 D25	D10 – 100/150

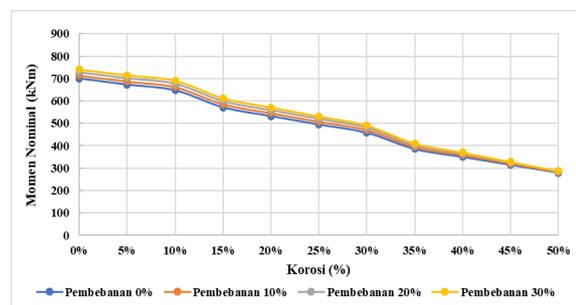
Tabel 3. Mutu dan sifat dari baja tulangan beton

Kelas Baja Tulangan	Kuat Luluh/Leleh (YS)	Kuat Tarik (TS)
BjTS 420B	420	525
BjTS 280	280	360

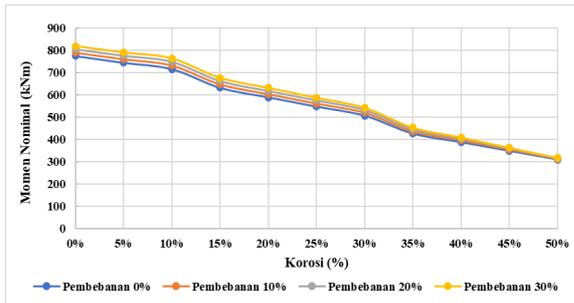
Hasil dan pembahasan

4.1 Momen Nominal

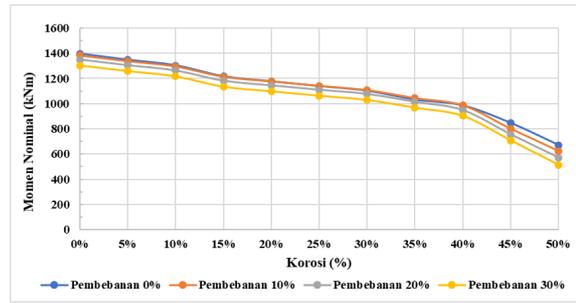
Momen Nominal ialah momen analisis penampang berdasarkan keseimbangan statis dan kompatibilitas tegangan – regangan. Momen nominal terbagi menjadi 2 arah yaitu M_{n_x} dan M_{n_y} , arah tersebut berdasarkan arah dari pemodelan kolom. Hasil pemodelan didapatkan nilai momen nominal sumbu X pada kolom C1 dengan hasil 846,76 kNm dengan korosi 0% dan penambahan beban 30% dengan momen nominal sumbu X adalah 740,11 kNm. Dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai momen nominal sumbu X dan Y. Pada korosi 50% nilai momen nominal tidak signifikan berbeda antara pembebanan 0%, 10%, 20%, dan 30%.



Gambar 4. Perbandingan grafik nilai momen nominal sumbu X terhadap korosi

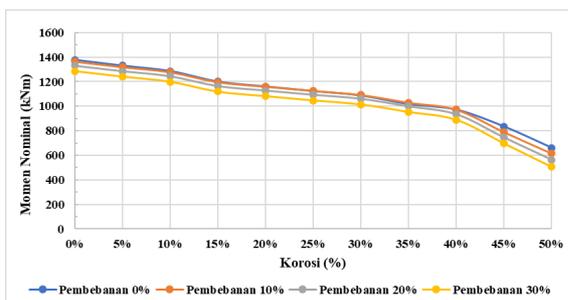


Gambar 5. Perbandingan grafik nilai momen nominal sumbu Y terhadap korosi



Gambar 7. Perbandingan grafik nilai momen nominal sumbu Y terhadap korosi

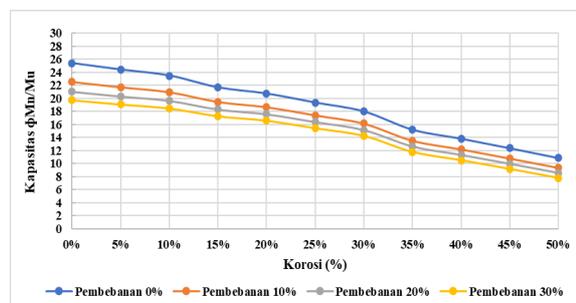
Kolom C4-1 yang memiliki penampang berbentuk L yang digunakan untuk menahan beban balok lift beban lift. Momen nominal sumbu X pada pembebanan 0% 1377,99 kNm adalah nilai tertinggi dan 615,23 kNm adalah nilai terendah, pembebanan 10% dengan nilai tertinggi 1364,73 kNm dan 615,23 kNm nilai terendah, pembebanan 20% dengan nilai tertinggi 1331,33 kNm dan 563,92 kNm, pembebanan 30% dengan nilai tertinggi 1285,55 kNm dan 506,84 kNm nilai terendah. Grafik momen nominal sumbu Y sama dengan momen nominal sumbu X yang memiliki nilai tertinggi pada pembebanan 0% dengan 1396,31 kNm dan pada korosi 15% mengalami penurunan dari 1303,74 kNm ke 1216,65 kNm. Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa terjadinya penurunan nilai momen nominal.



Gambar 6. Perbandingan grafik nilai momen nominal sumbu X terhadap korosi

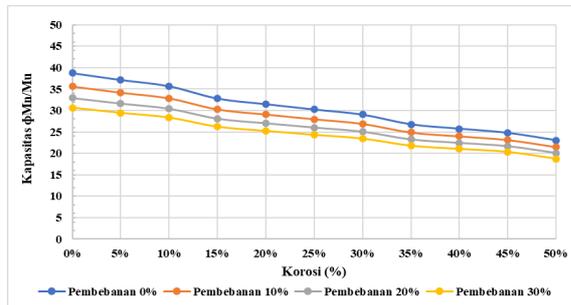
4.2 Kapasitas Momen

Kapasitas momen yang di dapatkan dari kolom berasal dari nilai $\phi M_n / M_u$ atau $\phi M_n > M_u$, sehingga momen nominal yang di rencanakan harus lebih besar dibandingkan nilai momen ultimit. Nilai kapasitas momen harus > 1 . Kapasitas momen di kolom C2 didapatkan nilai 25,369 di pembebanan 0% pada korosi 0% dan 22,522 di pembebanan 10% pada korosi 10%, dari kedua perbedaan persentase korosi tersebut dapat terlihat selisih nilai kapasitas momen yang cukup signifikan. Berbeda dengan korosi 25% dengan nilai 19,347 pada pembebanan 0% dan 17,404 pada pembebanan 10%. Pada Gambar 8 dan Gambar 9 terlihat nilai kapasitas momen pada korosi 50% memiliki nilai yang hampir sama antara semua pembebanan yaitu 10,853 pembebanan 0%, 9,356 pembebanan 10%, 8,522 pembebanan 20%, dan 7,768 pembebanan 30%. Kapasitas momen didapat ialah 7,48 pada korosi 0% dan menjadi nilai kapasitas momen terbesar pada studi ini. Selisih nilai kapasitas momen antar pembebanan 0%, 10%, 20%, dan 30% memiliki nilai yang hampir sama, contoh pada korosi 10% nilai pembebanan 0% ialah 6,949, pembebanan 10% ialah 6,451, pembebanan 20% ialah 6,024, dan pembebanan 30% ialah 5,657.



Gambar 8. Perbandingan grafik nilai kapasitas momen terhadap korosi

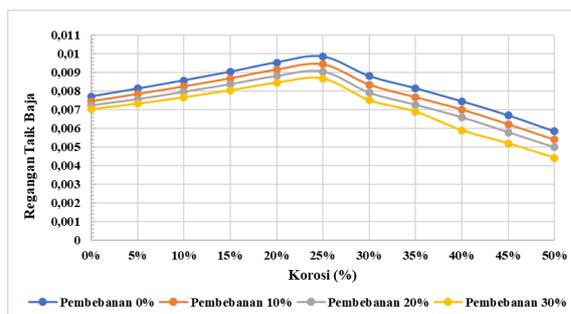
Grafik kapasitas momen dari kolom C4-2 terdapat penurunan yang signifikan pada korosi 10% ke 15%, pada pembebanan 0% yaitu 35,698 dan 32,812, pembebanan 10% dengan 32,867 dan 30,282, pembebanan 20% dengan 30,466 dan 28,107, dan pembebanan 30% dengan 28,345 dan 26,206. Perbandingan nilai kapasitas momen pada korosi 50% hampir sama antara semua pembebanan. Pada pembebanan 0% dengan nilai 23,034, pembebanan 10% dengan nilai 21,472, pembebanan 20% dengan nilai 20,065, dan pembebanan 30% dengan nilai 18,733.



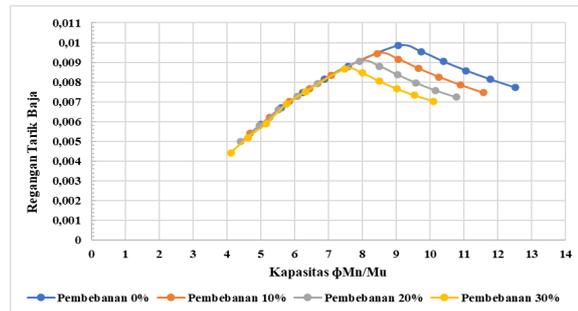
Gambar 9. Perbandingan grafik nilai kapasitas momen terhadap korosi

4.3 Regangan Tarik Baja

Regangan Tarik baja adalah bertambahnya panjang baja dari asal bentuk semula. Pada pengujian ini regangan tarik baja di bandingkan dengan korosi dan kapasitas momen. Grafik nilai regangan tarik baja terhadap korosi pada kolom C3 dapat dilihat pada Gambar 10 terlihat sangat signifikan naik dan turun sedangkan perbandingan nilai regangan tarik baja dan kapasitas momen ditunjukkan dalam gambar 11. Puncak nilai regangan tarik baja berada di korosi 25% dengan nilai 0,00985 pada pembebanan 0%, pembebanan 10% dengan nilai 0,00944, pembebanan 20% dengan nilai 0,00905, dan pembebanan 30% dengan nilai 0,00868.

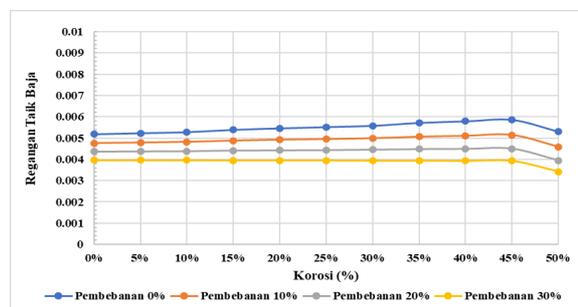


Gambar 10. Perbandingan grafik nilai regangan tarik baja terhadap korosi



Gambar 11. Perbandingan grafik nilai regangan tarik baja terhadap kapasitas momen

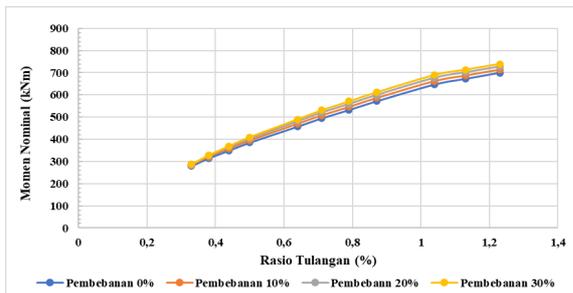
Grafik perbandingan regangan tarik baja terhadap korosi pada kolom C4-2 mengalami trend peningkatan yaitu pada pembebanan 0% didapatkan nilai regangan tarik baja tertinggi pada korosi 45%. Penurunan nilai regangan terjadi di korosi 50% dengan nilai 0,0053 dan 0,00383. Kemudian, nilai regangan tarik baja pembebanan 0% di bandingkan dengan pembebanan 30% yang mana di pembebanan ini gedung di asumsikan mengalami penambahan beban dikarenakan adanya gempa, sehingga nilai regangan tarik baja menjadi lebih rendah dibandingkan dengan pembebanan 0%. Di korosi 45%, nilai regangan tarik baja tertinggi yaitu 0,00396 terjadi di korosi 0%. Pada Gambar 12 Nilai regangan tertinggi pada pembebanan 0% yaitu 0,00586 dengan nilai kapasitas momen 24,77 dengan nilai regangan tarik baja 0,00431 dengan nilai kapasitas momen 3,66. Perbandingan pembebanan 0% dengan 30% jauh berbeda, pada pembebanan 30% nilai regangan tertinggi 0,00393 dengan nilai kapasitas momen 20,334 dengan nilai regangan tarik baja tertinggi yaitu 0,00245 dengan nilai kapasitas 4,114.



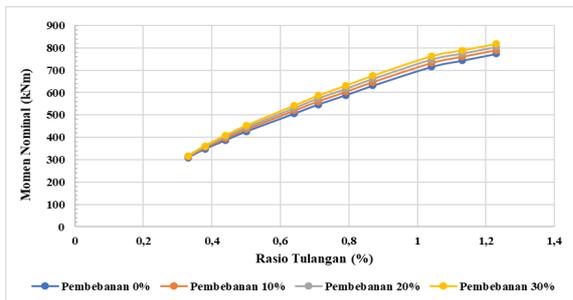
Gambar 12. Perbandingan grafik nilai regangan tarik baja terhadap korosi

4.4 Rasio Tulangan

Rasio tulangan adalah perbandingan antara luas tulangan dengan luas penampang dan minimal rasio tulangan adalah 1%. Berdasarkan Gambar 13 dan Gambar 14, perbandingan nilai rasio tulangan terhadap momen nominal sumbu X pada kolom C1. Nilai rasio tulangan terbesar yaitu 1,23% yang mana nilai regangnya adalah 699,75 kNm. Pada nilai rasio tulangan yaitu 1,04% dengan nilai 646,71 kNm yang mana nilai tersebut adalah nilai minimum pada pembebanan 0%. Pembebanan 10% dengan nilai rasio tulangan 1,23% dan momen nominal X yaitu 713,98 kNm, di rasio tulangan 1,04% dengan nilai momen nominal X yaitu 661,93 kNm. Pembebanan 20% dengan nilai rasio tulangan 1,24% dan momen nominal X yaitu 727,33 kNm, di rasio tulangan 1,04% dengan nilai momen nominal X yaitu 676,56 kNm. Pembebanan 30% dengan nilai rasio tulangan 1,24% dan momen nominal X yaitu 740,11 kNm, di rasio tulangan 1,04% dengan nilai momen nominal X yaitu 762,18 kNm.



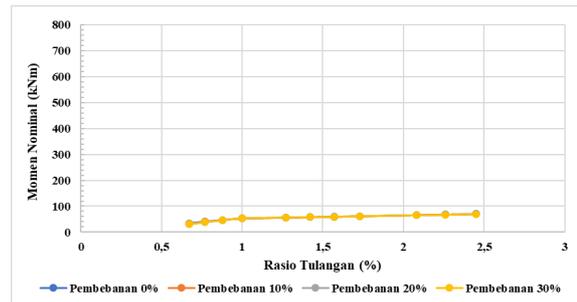
Gambar 13. Perbandingan nilai rasio tulangan terhadap momen nominal sumbu X



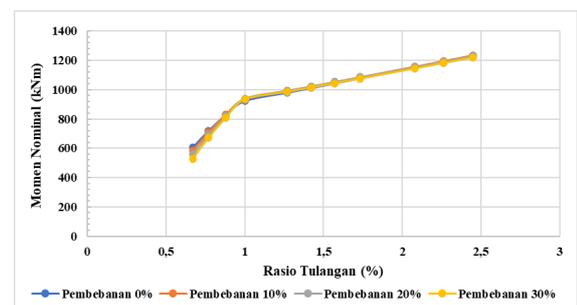
Gambar 14. Perbandingan nilai rasio tulangan terhadap momen nominal sumbu Y

Pada kolom C5 didapatkan nilai rasio tulangan terbesar yaitu 2,45% dan 1% nilai rasio tulangan terendah. Di momen nominal sumbu X didapatkan nilai 70,22 kNm di rasio tulangan maksimum dan 52,61 kNm di rasio tulangan minimum pada pembebanan 0%. Pembebanan 10% dengan

rasio tulangan maksimum didapatkan momen nominal 70,34 kNm dan rasio tulangan minimum 53,18 kNm. Pembebanan 20% dengan rasio tulangan maksimum yaitu 70,22 kNm dan rasio tulangan minimum yaitu 53,56 kNm. Pembebanan 30% dengan rasio tulangan maksimum yaitu 69,52 kNm dan 53,1 kNm di rasio tulangan minimum. Momen nominal sumbu Y di kolom C5 didapatkan nilai 1231,75 kNm di rasio tulangan maksimum dan 922,84 kNm di rasio tulangan minimum pada pembebanan 0%. Pembebanan 10% dengan nilai rasio tulangan maksimum didapatkan nilai momen yaitu 1233,82 kNm dan 932,9 kNm di rasio tulangan minimum. Pembebanan 20% dengan nilai rasio tulangan maksimum didapatkan nilai momen yaitu 1231,71 kNm dan 939,56 kNm di rasio tulangan minimum. Pembebanan 30% dengan nilai rasio tulangan maksimum didapatkan nilai momen yaitu 1219,37 kNm dan 931,46 kNm di rasio tulangan minimum. Gambar 15 menunjukkan nilai momen nominal yang menurun sangat signifikan pada korosi di bawah 1%.



(a) Momen nominal sumbu X



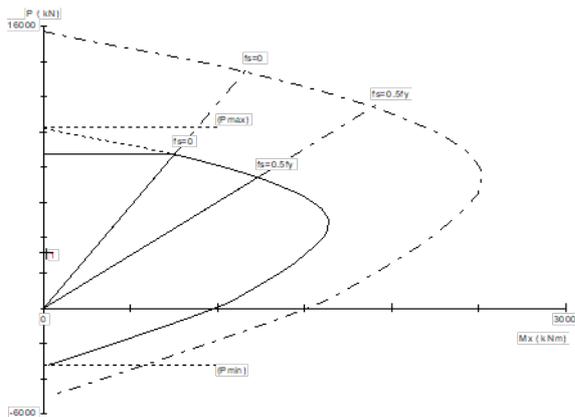
(b) Momen nominal sumbu Y

Gambar 15. Grafik momen nominal (a) momen nominal sumbu X terhadap rasio tulangan dan (b) momen nominal sumbu Y terhadap rasio tulangan pada kolom C5

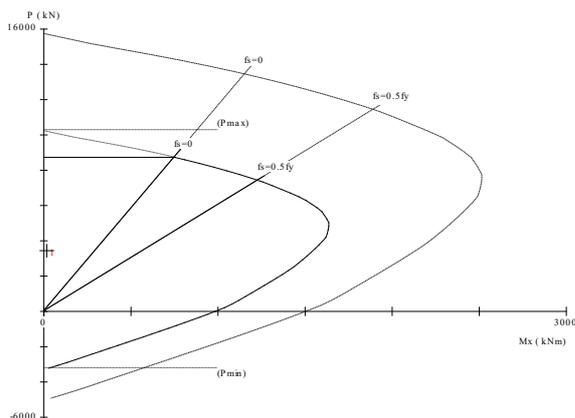
4.5 Diagram Interaksi

Diagram interaksi adalah grafik yang menghubungkan beban aksial dengan momen lentur pada komponen struktur tekan. Setiap titik pada

kurva mewakili kombinasi kekuatan beban nominal (P_n) dan momen nominal (M_n) pada posisi tertentu relatif terhadap sumbu netral. Diagram interaksi ini dapat dijadikan indicator untuk menganalisis penampang pada kolom, apalagi jika pengaruh beban gempa juga diperhitungkan selama proses analisis (Taufik, dkk. 2021). Adapun diagram interaksi kolom C4-1 pada penambahan beban 0% dan korosi 0% ditunjukkan dalam Gambar 16. Gambar 17 menunjukkan diagram interaksi kolom C4-1 pada saat diberikan beban tambahan 10% dan tingkat korosi 0%. Pada kolom C4-1 beban 0% dengan tingkat korosi 0% didapatkan nilai P_u yaitu 3129,38 kN, M_{u_x} yaitu 15,89 kN.m dan M_{u_y} yaitu 16,1 kN.m, sedangkan nilai P_u , M_{u_x} , dan M_{u_y} pada kolom C4-1 beban 10% dengan tingkat korosi 0% yaitu 3442,32 kN untuk nilai P_u , 17,48 untuk nilai M_{u_x} dan 17,71 untuk M_{u_y} .



Gambar 16. Diagram interaksi pada kolom C4-1
Beban 0% korosi 0%



Gambar 17. Diagram interaksi pada kolom C4-1
Beban 10% Korosi 0%

5. Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai bahwa:

- Kolom C1, C2, dan C3 dapat menahan beban struktur sampai tingkat korosi 20%, sedangkan kolom C4-1, C4-2 dan C5 mampu menahan beban sampai tingkat korosi 45% di semua kasus.
- Nilai kuat lentur nominal dan kapasitas momen mengalami penurunan hingga 36% pada kolom C4-2 dengan beban 0% dan tingkat korosi 0% - 45%.
- Nilai regangan tarik baja meningkat hingga 21% pada kolom C4-2 dengan beban 0% dan tingkat korosi 0% - 45%.
- Hasil diagram interaksi diantara studi kasus I dan II memiliki hasil diagram interaksi yang sama. Kolom mampu menahan hingga 50% tingkat korosi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anisa, E. A., Afriansya, R., Randisyah, J., & Astuti, P. (2021). Studi Pemanfaatan Prekursor Fly Ash Lokal pada Self Compacting Geopolymer Concrete (SCGC). *Semesta Teknika*, 24(2), 111-119.
- Astuti, P. (2015). Pengaruh Penambahan Dinding Geser (Shear Wall) pada Waktu Getar Alami Fundamental Struktur Gedung. *Semesta Teknika*, 18(2), 140-146.
- Astuti, P. (2016). Studi Perbandingan Dinding Geser dan Bracing Tunggal Konsentris sebagai Pengaku pada Gedung Bertingkat Tinggi. *Semesta Teknika*, 19(2), 176-182.
- 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. *Journal of Thailand Concrete Association*, 6(2), 24-31.
- Astuti, P., Rafdinal, R. S., Hamada, H., Sagawa, Y., Yamamoto, D., & Kamarulzaman, K., Effectiveness of rusted and non-rusted reinforcing bar protected by sacrificial anode cathodic protection in repaired patch concrete. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 366, No. 1, p. 012013, 2019.
- Astuti, P., Kamarulzaman, K., Rafdinal, R. S., Hamada, H., Sagawa, Y., & Yamamoto, D., Influence of Rust Removal Process on The Effectiveness of Sacrificial Anode Cathodic Protection in Repair Concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 849, No. 1, p. 012088, 2020.
- Astuti, P., Kamarulzaman, K., & Hamada, H., 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), 2021, pp.148-157.
- Fonna, S., Huzni, S., & Ariffin, A. K. (2018). Boundary element inverse analysis for rebar corrosion detection: Study on the 2004 tsunami-affected structure in Aceh. *Case studies in construction materials*, 8, 292-298.
- Karyono, T., Budianto, B., & Pamungkas, R. G. (2017). Analisis teknik pencegahan korosi pada lambung kapal dengan variasi sistem pencegahan ICCP dibandingkan dengan SACP. *Jurnal Pendidikan PROFESIONAL*, 6(1).
- Pattireuw, K. J., Rauf, F. A., & Lumintang, R. C. A. (2013). Analisis laju korosi pada baja karbon dengan Menggunakan air laut dan H₂SO₄. *Jurnal Online Poros Teknik Mesin Unsrat*, 2(1).
- Simatupang, P. H., Sir, T. M., & Wadu, V. A. (2020). Integrasi Program Tekla Structures dan SAP2000 Dalam Perencanaan Gedung Beton Struktural. *Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 67-80.
- Soenaryo, A., Hidayat, M. T., & Siswanto, H. (2012). Perbaikan Kolom Beton Bertulang Menggunakan Concrete Jacketing dengan Prosentase Beban Runtuh yang Bervariasi. *Rekayasa Sipil*, 3(2), 91-100.
- Sidiq, M. F. (2013). Analisa korosi dan pengendaliannya. *Jurnal foundry*, 3(1), 25-30.
- Siregar, A. P. (2006). Laju Korosi Tulangan Pada Mutu Beton Berbeda. *SMARTek*, 4(2).
- Solikin, M. dan Setiawan, B., (2015). Diagram Interaksi Kolom Bangunan Perumahan Di Wilayah Surakarta Dalam Memenuhi Persyaratan Memikul Beban Gempa. *Prosiding Seminar Nasional, Universitas Muhammadiyah Surakarta*.
- Taufik, I., Yadi, S., & Astuti, P. (2021). Respons ketidakberaturan struktur torsi dan torsi berlebih gedung 16 lantai menggunakan metode linear time history analysis. *Konstruksia*, 13(1), 181-191.
- Utomo, S. (2015). Pengaruh Konsentrasi Larutan NaNO₂ sebagai Inhibitor terhadap Laju Korosi Besi dalam Media Air Laut. *Jurnal Teknologi*, 7(2), 93-103.
- Wonlele, T., Dewi, S. M., & Nurlina, S. (2013). Penerapan bambu sebagai tulangan dalam struktur rangka batang beton bertulang. *Rekayasa Sipil*, 7(1), 1-12.