

PENGARUH PENAMBAHAN *MEZZANINE* BAJA TERHADAP KERETAKAN BALOK BETON BERTULANG DAN ALTERNATIF PERBAIKANNYA

Antonius Erick Susanto¹, Basuki Anondho¹, dan Arianti Sutandi^{1*}

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

*ariantis@ft.untar.ac.id

Masuk: 01-07-2025, revisi: 05-08-2025, diterima untuk diterbitkan: 11-11-2025

ABSTRACT

The addition of a lightweight steel mezzanine to an existing building can introduce unexpected loads on structural elements if not properly planned and managed during project execution. This study evaluates a case at the head office of PT. XYZ in East Jakarta, where the main beam (Bext) experienced cracking following the installation of the mezzanine. Structural modeling simulations revealed significant increases in internal forces, namely torsional moment by 354%, shear by 274.7%, and bending moment by 245.8%, leading to structural cracking. This study compares two repair methods from a construction management perspective: ferrocement wrapping and reinforced concrete jacketing. Both methods are suitable for repairing beam cracks caused by torsion. The analysis covers cost, construction duration, technical performance, and site limitations. Based on the cost calculation, reinforced concrete jacketing requires IDR 10,434,276 with a construction period of 15 days, while the ferrocement method requires IDR 13,345,145 over 8 days. Therefore, the recommended repair method is reinforced concrete jacketing.

Keywords: Repair Method; Steel Mezzanine; Torsion Cracks; Reinforced Concrete Jacketing; Ferrocement

ABSTRAK

Penambahan mezzanine baja ringan dalam bangunan eksisting dapat menimbulkan beban tak terduga pada elemen struktural jika tidak direncanakan dan dikelola dengan baik dalam pelaksanaan proyek. Studi ini mengevaluasi kasus di kantor pusat PT. XYZ, Jakarta Timur, di mana balok utama (Bext) mengalami retak akibat pemasangan mezzanine. Dari hasil simulasi modelling dengan software struktural didapatkan peningkatan gaya dalam yang signifikan yaitu pada momen torsi 354%, geser 274,7%, dan lentur 245,8%. Dari hasil perhitungan dan dari pola retak balok di lapangan, disimpulkan balok mengalami keretakan torsi. Pada studi ini dibandingkan dua metode perbaikan, yaitu ferrocement dan jacketing beton bertulang yang cocok untuk keretakan akibat torsi. Analisis mencakup aspek biaya, durasi dan metode pelaksanaan. Dari hasil perhitungan biaya, didapatkan bahwa metode Jacketing beton memerlukan biaya sebesar Rp. 10.434.276 dengan waktu pelaksanaan selama 15 hari, dan metode ferrocement wrapping memerlukan biaya sebesar Rp.13.345.145 selama 8 hari. Dari segi metode pelaksanaan, metode jacketing lebih sesuai dengan kondisi lapangan karena dimensi akhir perbaikan balok memiliki elevasi yang sama dengan lantai rencana mezzanine. Sehingga, metode perbaikan yang direkomendasikan adalah metode Jacketing beton bertulang.

Kata kunci: Metode Perbaikan; *Mezzanine* Baja; Retak Torsi; *Jacketing* Beton Bertulang; *Ferrocement*

1. PENDAHULUAN

Penambahan *mezzanine* baja sering dijadikan solusi untuk meningkatkan ruang dalam bangunan tanpa menambah jumlah lantai penuh. Namun, hal ini dapat menambah beban signifikan pada elemen struktural eksisting seperti balok beton bertulang. Beban tambahan dari *mezzanine* berpotensi memicu kerusakan struktural berupa retak lentur, geser, dan torsi. *Mezzanine* baja memiliki keunggulan dalam segi efisiensi ruang dan kemudahan pemasangan, namun keberadaannya dapat mempengaruhi distribusi beban pada elemen struktural di bawahnya, khususnya pada balok beton bertulang (Nawy, 2010). Penambahan beban dari *mezzanine* baja dapat menyebabkan peningkatan tegangan dan deformasi pada balok beton, yang berpotensi memicu retak struktural jika tidak dirancang dengan baik (Ryu et al., 2018)

Retak pada balok beton bertulang menjadi salah satu indikator adanya potensi kerusakan struktural. (Al-Osta et al., 2018) menjelaskan bahwa beban berlebih akibat perubahan fungsi bangunan dapat menurunkan kapasitas elemen struktur secara signifikan. Retak lentur biasanya muncul di tengah bentang, retak geser dekat tumpuan, dan retak torsi memiliki pola spiral akibat puntiran berlebih. Jika tidak segera ditangani, retakan tersebut dapat berkembang dan

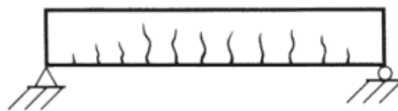
menyebabkan kegagalan struktur. juga menegaskan bahwa peningkatan beban dapat menyebabkan penurunan kapasitas dukung dan mendorong kegagalan struktur jika tidak diantisipasi.

Keretakan pada balok bertulang

Keretakan pada balok beton bertulang merupakan salah satu indikasi awal dari penurunan kapasitas struktur. Retakan dapat terjadi karena berbagai faktor, seperti pembebanan berlebih, tegangan geser, momen lentur, deformasi akibat perubahan suhu, hingga proses korosi pada tulangan baja di dalam beton (ACI Committee, 2019). Menurut (Saputra et al., 2014), retak struktural dapat terjadi karena adanya kesalahan desain atau juga bisa terjadi karena beban yang melebihi kapasitas sehingga dapat membahayakan bangunan. Retak pada struktur dapat diidentifikasi dengan melihat tiga parameternya, yaitu lebarnya, panjangnya dan pola umumnya (Ghafur, 2009). Menurut (McCormac & Brown, 2015), retak pada balok beton bertulang dibedakan menjadi :

1. Retak lentur

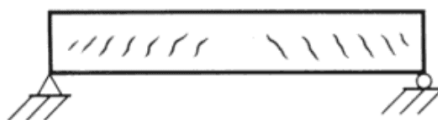
Retak ini terjadi akibat gaya tarik maksimum yang bekerja di tengah bentang balok. Dilihat dari Gambar 1, retak ini merupakan retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok hingga ke daerah sumbu netralnya. Dimulai dari sisi balok yang menerima gaya tarik sampai pada sumbu netral. Untuk balok dengan beban merata yang seragam, lebar retak pada bagian tengah balok lebih besar karena momen lentur yang terjadi pada bagian tengah balok lebih besar dibanding bagian lain.



Gambar 1. Retak lentur (McCormac & Brown, 2015)

2. Retak miring

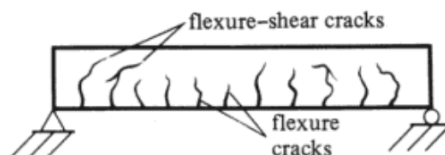
Retak miring atau dapat disebut juga dengan retak geser *web* karena terjadi pada bagian *web* (badan) balok beton bertulang, dapat terjadi secara bebas atau kelanjutan dari retak lentur. Retak ini dapat berkembang di badan balok beton bertulang baik sebagai retakan sendiri maupun sebagai lanjutan dari retak lentur. Retak ini sering muncul pada bagian *web* prategang, terutama balok yang memiliki *flange* besar dengan *web* yang tipis. Pola retakan ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Retak miring (McCormac & Brown, 2015)

3. Retak geser lentur

Retak ini terjadi akibat pengaruh gaya geser dan momen lentur secara bersamaan. Umumnya retak ini terjadi pada balok prategang dan non prategang. Pola retakan retak geser lentur dapat dilihat pada Gambar 3.

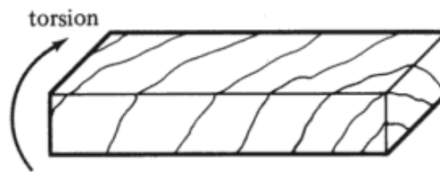


Gambar 3. Retak geser lentur (McCormac & Brown, 2015)

4. Retak puntir (*torsion crack*)

Retak puntir seperti pada Gambar 3 sama hal nya dengan retak miring hingga melingkar di sekeliling balok. Jika suatu elemen beton polos dikenai torsi murni, maka elemen tersebut akan retak dan mengalami kegagalan sepanjang garis spiral 45° akibat tegangan diagonal yang sesuai dengan tegangan torsi. Meskipun retak torsi sangat mirip dengan

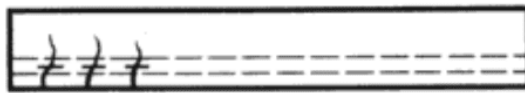
tegangan geser, retak ini terjadi pada semua sisi suatu elemen. Akibatnya, retakan ini menambah tegangan geser di satu sisi dan mengurangnya di sisi lain.



Gambar 4. Retak puntir (McCormac & Brown, 2015)

5. Retak lekatan

Retak ini terjadi akibat adanya tegangan ikatan antara beton dan tulangan, sehingga menyebabkan adanya pemisahan antara beton dan tulangan di sepanjang tulangan. Pola retakan ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Retak lekatan (McCormac & Brown, 2015)

Metode perbaikan

Beberapa metode perbaikan telah dikembangkan untuk menangani retak pada balok beton bertulang yang mengalami kerusakan akibat pembebanan berlebih. Berikut ini disajikan beberapa teknik perbaikan untuk menangani kerusakan yang umum terjadi pada beton (Isneini, 2009) :

1. *Routing dan Sealing*

Teknik ini digunakan untuk memperbaiki retak yang bersifat *dormant* dan tidak memiliki signifikansi *structural*. Dengan metode ini, retak diperbesar sepanjang permukaan yang terekspos dan mengisinya dengan *joint sealant* yang sesuai. Sebagai *sealant* dapat dipilih senyawa *epoxy*, selain itu dapat *urethane* yang akan tetap fleksibel pada perubahan temperatur yang besar.

2. *Jacketing*

Pada cara ini, material dilekatkan dengan menggunakan pengencang pada beton. Material ini dapat berupa metal, karet plastik, atau beton dengan kekuatan tinggi. Pengencangan dilakukan dengan baut, paku, sekrup, adhesive atau *straps*.

Selain itu, terdapat beberapa metode perbaikan lainnya, yaitu *ferrocement*. *Ferrocement* merupakan metode perbaikan pada balok beton dengan menggunakan material komposit yang terdiri dari mortar semen dan beberapa lapisan jaring kawat kecil yang terdistribusi rapat dan berkesinambungan (Alzabidi et al., 2023). Menurutny, kombinasi material ini menghasilkan material yang kuat, tahan lama, dan tahan terhadap retak dan korosi.

Concrete jacketing

Metode *jacketing* merupakan salah satu teknik yang umum digunakan dalam memperkuat dan memperbaiki elemen struktur beton dalam memperkuat dan memperbaiki elemen struktur bertulang. Teknik ini melibatkan penambahan lapisan beton atau bahan lain di sekitar elemen struktural yang ada untuk meningkatkan kapasitas daya dukungnya. Dilihat dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hidayati (2022) mengevaluasi dan memperkuat kolom beton bertulang yang terkena kebakaran menggunakan metode *concrete jacketing*. Hasilnya menunjukkan bahwa kolom yang diperkuat dengan *concrete jacketing* dapat menahan gaya-gaya yang bekerja sesuai dengan standar gedung terbaru. Selain itu, penelitian oleh Intan dan Cahyono (2024) membahas kekuatan balok penopang kolom transfer rumah tinggal tiga lantai yang retak akibat getaran.

Ferrocement

Ferrocement merupakan material komposit yang terdiri dari mortir semen dan beberapa lapisan jaring kawat kecil yang saling terkait, yang digunakan untuk memperbaiki serta memperkuat balok beton bertulang yang terkena beban torsi dengan memberikan keuntungan biaya dan kinerja yang signifikan (Alzabidi et al., 2023). Metode perbaikan pada balok beton bertulang seperti *Fiber reinforced polymer* (FRP), *jacketing*, *grouting* telah banyak digunakan

sebagai metode untuk memperbaiki dan memperkuat balok beton bertulang yang terkena beban torsi, sedangkan penggunaan metode *ferrocement* ini masih terbatas. Menurut Taha et al. (2024), *ferrocement* terbukti sebagai metode yang efektif untuk perbaikan balok beton bertulang yang rusak. Mengingat karakter torsi yang berputar dan konsentrasi tegangan geser akibat torsi yang terjadi di bagian tepi balok, penggunaan *ferrocement* sebagai bahan pembungkus dianggap efektif dalam melindungi balok yang mengalami gangguan akibat torsi, dengan meningkatkan kapasitas daya dukung dan daktilitas pada balok (Taha et al., 2024). Hasil uji yang dilakukan oleh Taha et al, terdapat peningkatan kapasitas yang signifikan pada balok dalam menahan retak spiral akibat torsi dan meningkatkan kontrol retakan. Metode *ferrocement* ini dilakukan dengan cara balok dilapisi oleh mortar semen yang terdiri dari campuran semen, air, pasir halus dan digunakan bahan tambahan seperti *Styrene-Butadine Rubber* (SBR) untuk meningkatkan daya rekat dan fleksibilitas, lalu menggunakan *wiremesh* atau jaring kawat seperti pada Gambar 6 sebagai tulangan sekunder yang berfungsi sebagai penahan retakan dan memperkuat lapisan mortar. *Styrene-Butadine Rubber* (SBR) merupakan jenis karet sintesis yang digunakan sebagai bahan aditif atau bahan pengikat (*bonding agent*) dalam campuran mortar. Sehingga SBR ini menjadi material yang cukup penting dalam metode ini untuk meningkatkan daya rekat antara *ferrocement* dan permukaan balok beton eksisting, mengurangi retak susut (*shrinkage cracking*) dan juga dapat meningkatkan daktilitas dan ketahanan terhadap air / kelembapan.



Gambar 6. Metode *ferrocement* pada balok bertulang (Taha et al., 2024)

Rumusan masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini merupakan :

1. Berapa besar pengaruh penambahan *mezzanine* baja terhadap peningkatan gaya dalam pada balok penopang (balok B_{ext}) ?
2. Faktor apakah yang menjadi penyebab kegagalan/keretakan yang diakibatkan oleh beban tambahan tersebut ?
3. Bagaimana cara menentukan metode perbaikan yang cocok untuk mengatasi kegagalan yang terjadi ?

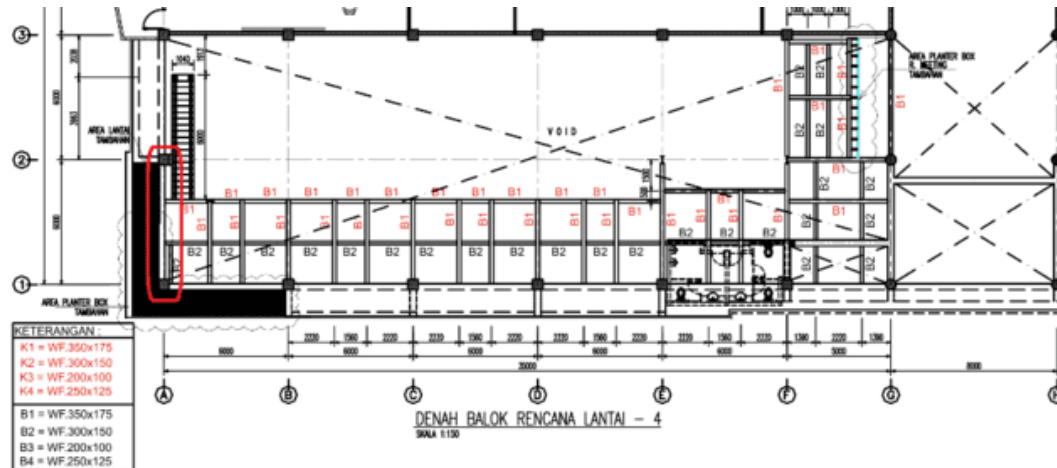
Tujuan penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah :

1. Menganalisis peningkatan gaya dalam yang diterima balok penopang (balok B_{ext}) akibat penambahan *mezzanine* baja.
2. Mengidentifikasi penyebab utama masalah yang terjadi pada struktur balok retak yang diteliti.
3. Menentukan metode perbaikan yang cocok untuk retakan pada balok.

Studi kasus

Penelitian dilakukan berdasarkan studi kasus pada bangunan *head office* PT. XYZ di Jakarta Timur. Setelah penambahan struktur *mezzanine* baja, ditemukan adanya retakan pada balok eksisting (balok B_{ext}) yang diduga retak akibat beban tambahan. Balok B_{ext} terletak di lantai 4 yang dapat dilihat pada Gambar 7 dan berfungsi sebagai penopang utama sambungan antarbalok serta menerima beban langsung dari lantai *mezzanine* yang baru dipasang. Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak *software* struktural untuk menganalisis distribusi tegangan dan deformasi sebelum dan sesudah penambahan *mezzanine*.



Gambar 7. Denah lokasi balok B_{ext} di lantai 4

2. METODE PENELITIAN

Jenis penelitian

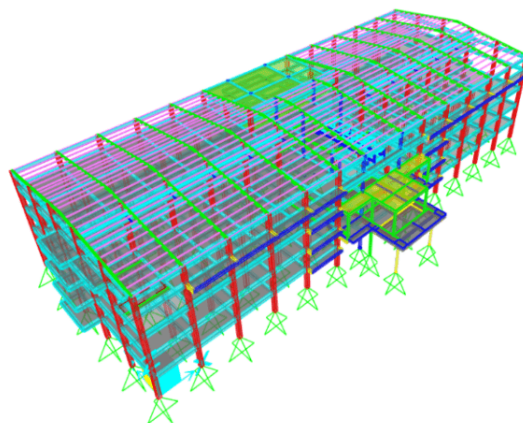
Penelitian ini merupakan penelitian yang bersifat kuantitatif dan analisis dengan melakukan pendekatan numerik menggunakan aplikasi *software* struktural, yang bertujuan untuk mengetahui distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi pada balok beton bertulang akibat beban tambahan berupa *mezzanine* baja. Lalu, dari hasil pola retakan, dapat diidentifikasi metode perbaikan yang cocok dan mengevaluasi efektivitas metode perbaikan. Pendekatan ini dilakukan untuk mendapatkan gambaran nyata serta simulasi dari perilaku balok beton bertulang terhadap pembebanan tambahan.

Sumber data

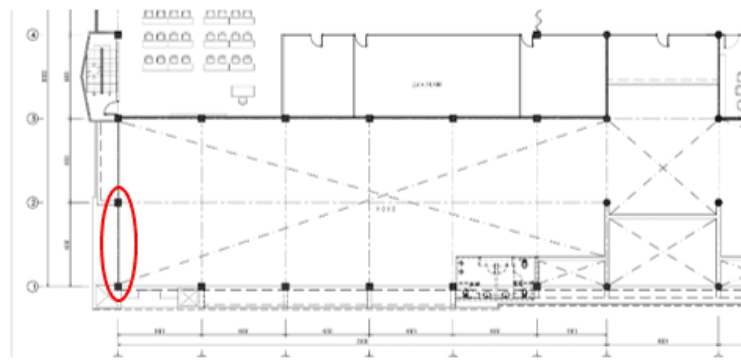
Data diperoleh dari proyek bangunan *head office* PT. XYZ di Jakarta Timur. Data yang digunakan meliputi gambar struktur eksisting, data dimensi balok yang dianalisis (balok B_{ext}), data bangunan *head office*, data rencana struktur *mezzanine* yang akan dibangun, serta dokumentasi kondisi aktual lapangan.

Prosedur analisis

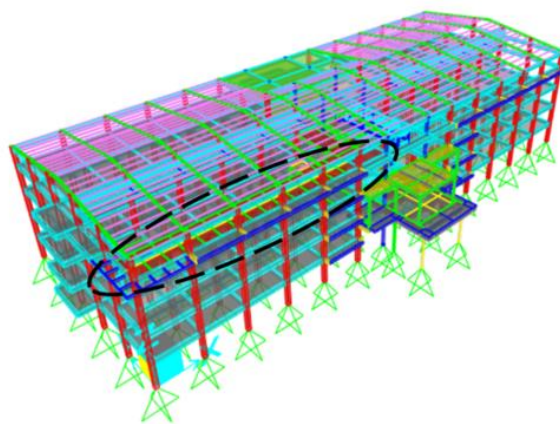
Pemodelan struktur Gedung *head office* PT.XYZ dilakukan menggunakan perangkat lunak *software* struktural dalam dua skenario, yaitu kondisi awal sebelum adanya struktur *mezzanine* baja seperti pada Gambar 8 dan Gambar 9 dan kondisi setelah *mezzanine* baja terpasang seperti pada Gambar 10 dan Gambar 11. Pada *modelling* struktur gedung tersebut, hanya memperhitungkan beban mati struktur, beban hidup, dan beban tambahan akibat struktur *mezzanine*. Dari hasil simulasi *modelling*, akan dilakukan perbandingan pada gaya dalam seperti momen lentur, gaya geser, dan torsi pada balok B_{ext} sebelum dan sesudah adanya struktur *mezzanine*.



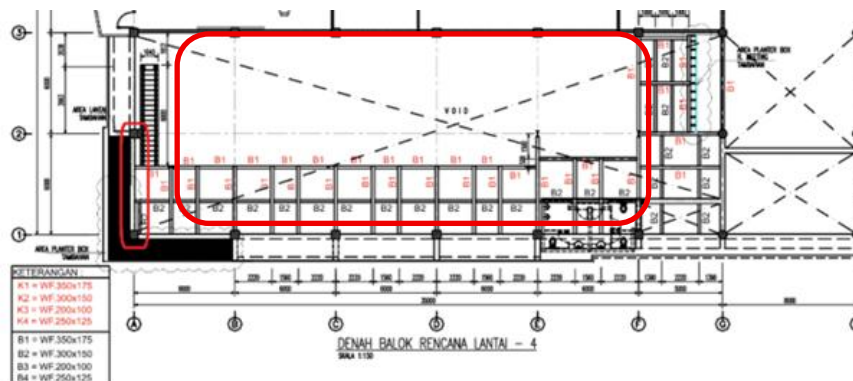
Gambar 8. Pemodelan struktur *head office* PT. XYZ sebelum ditambahkan *mezzanine* baja



Gambar 9. Denah lantai 4 *head office* PT. XYZ sebelum ditambahkan *mezzanine* baja & posisi balok B_{ext}



Gambar 10. Pemodelan Struktur *Head Office* setelah ditambahkan *mezzanine* baja



Gambar 11. Denah lantai 4 *head office* PT. XYZ setelah ditambahkan *mezzanine* baja

Teknik pengolahan data

Data yang diperoleh dari dianalisis menggunakan metode berikut :

1. Analisis distribusi tegangan dan deformasi

Pada analisis ini, dibutuhkan untuk mengidentifikasi tegangan maksimum dan deformasi pada balok yang diuji akibat beban tambahan berupa *mezzanine* baja. Lalu dari hasil analisis tersebut, akan dilakukan pemeriksaan apakah tegangan yang terjadi melampaui kapasitas izin dari material beton dan baja. Dari hasil simulasi pemodelan, dilakukan perbandingan gaya dalam antara kondisi sebelum dan sesudah penambahan beban *mezzanine* baja. Perbandingan ini mencakup perubahan nilai momen lentur, gaya geser, dan momen torsi yang bekerja pada balok B_{ext} .

2. Identifikasi pola retak

Melalui analisis tersebut, dapat diidentifikasi peningkatan gaya dalam yang signifikan akibat penambahan beban, sehingga dapat disimpulkan penyebab utama terjadinya retakan pada balok, apakah disebabkan oleh lentur, geser, torsi, atau kombinasi dari ketiganya. Didukung dengan pola retakan yang terjadi pada balok B_{ext} di lapangan sesuai dengan teori retak lentur, geser, dan longitudinal.

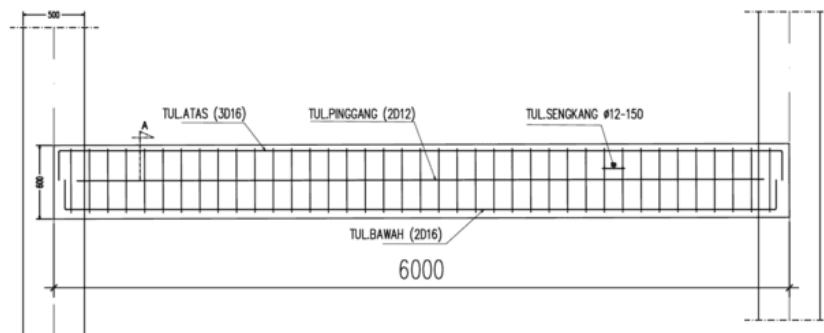
3. Evaluasi efektivitas metode perbaikan yang digunakan

Pada tahap ini, dapat diketahui apakah balok beton yang diuji mengalami peningkatan kapasitas struktur setelah metode perbaikan dilakukan. Dua metode perbaikan yang akan dianalisis pada penelitian ini adalah *jacketing* beton yang merupakan perkuatan dengan penambahan dimensi dan tulangan eksternal, dan metode *ferrocement* yang merupakan perkuatan menggunakan mortar dan *wire mesh* pada permukaan balok. Dari kedua metode tersebut akan dibandingkan dalam aspek biaya, waktu pelaksanaan, dan peningkatan kapasitas balok B_{ext} terhadap lentur, geser, dan torsi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi lapangan

Pada tahap awal dilakukan observasi terhadap bangunan eksisting milik PT. XYZ di Jakarta Timur, yang mengalami perubahan fungsi ruang dengan menambahkan struktur *mezzanine* baja. Penambahan ini menyebabkan distribusi beban pada balok eksisting berubah karena beban *mezzanine* baja ini tidak direncanakan pada saat bangunan ini dirancang. Berdasarkan spesifikasi desain akhir seperti pada Gambar 12 (*Site design final*), balok tersebut memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan beban tambahan dari *mezzanine* baja, selama pelaksanaan konstruksi sesuai dengan spesifikasi perencanaan. Setelah dilakukan pemasangan dan penguncian struktur baja *mezzanine*, balok langsung mengalami retakan setelah balok B_{ext} menahan beban tambahan dari sambungan baja, mengindikasikan adanya kegagalan dini pada balok B_{ext} .

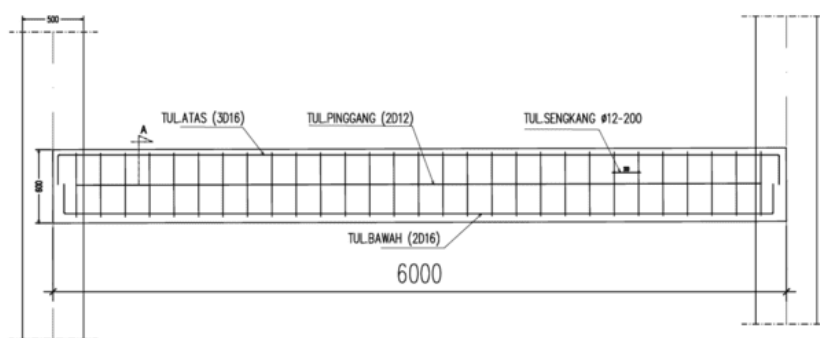


Gambar 12. Tampak samping detail balok B_{ext} sesuai *site design final*

Karena adanya retakan pada balok B_{ext} , dilakukan pengupasan selimut beton pada satu bagian atas balok untuk mengidentifikasi detail tulangan di dalam balok apakah sesuai dengan *site design final* atau tidak. Setelah dilakukan verifikasi seperti pada Gambar 13, hasil inspeksi lapangan menunjukkan bahwa kondisi aktual balok tidak sesuai dengan gambar desain. Salah satu ketidaksesuaian yang paling signifikan adalah pada jarak tulangan geser (sengkang), yaitu apabila sesuai dengan gambar desain, jarak antar sengkang harusnya berjarak 150mm, sedangkan pada balok aktual jarak antar sengkang sebesar 200mm seperti pada Gambar 14 yang menunjukkan detail tulangan pada balok aktual di lapangan.



Gambar 13. Pengupasan selimut beton pada balok B_{ext}



Gambar 14. Tampak samping detail aktual balok B_{ext} di lapangan

Hasil simulasi dan analisis gaya dalam

Hasil simulasi gaya dalam diperoleh langsung dari *output software* struktural pada dua kondisi analisis yaitu sebelum dan sesudah *mezzanine* dipasang. Hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan beban *mezzanine* baja pada balok B_{ext} berdampak langsung pada peningkatan gaya – gaya dalam utama, yaitu momen lentur (M_3), gaya geser (V_2), dan torsi (T). Nilai perbandingan antara kondisi sebelum dan sesudah *mezzanine* ditampilkan pada Tabel 1.

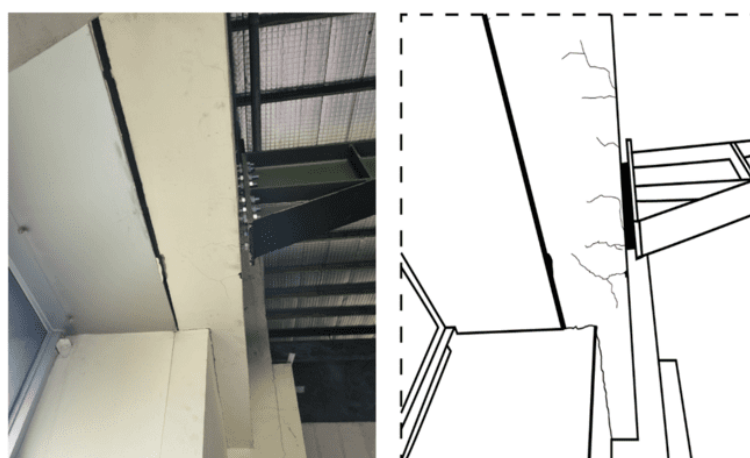
Tabel 1. Perbandingan hasil gaya dalam pada balok B_{ext}

Jenis gaya	Sebelum <i>mezzanine</i>	Sesudah <i>mezzanine</i>	Kenaikan (%)
Momen lentur (M_3)	-23,1186 kNm	-79,94 kNm	245,8%
Geser (V_2)	-19,052 kN	71,38 kN	274,7%
Torsi (T)	-1,7442 kNm	-7,92 kNm	354%

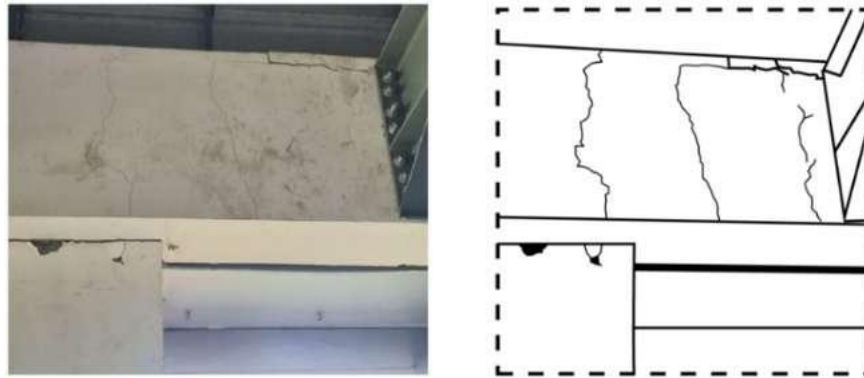
Dari Tabel 1, terlihat bahwa peningkatan paling besar terjadi pada gaya akibat torsi, yaitu sebesar 354%. Kenaikan signifikan pada gaya – gaya ini secara langsung meningkatkan risiko kerusakan struktural pada balok, terutama jika kapasitas aktual balok lebih rendah dari kapasitas rencana, misalnya akibat kesalahan pelaksanaan seperti jarak sengkang yang tidak sesuai gambar desain.

Identifikasi pola retakan

Pada proses ini, dilakukan perbandingan antara pengamatan visual di lapangan dengan korelasi sesuai dengan studi literatur. Analisis terhadap keretakan pada balok B_{ext} tidak hanya didasarkan pada hasil simulasi numerik, tetapi juga diperkuat dengan adanya pengamatan visual langsung di lapangan. Dokumentasi kondisi eksisting menunjukkan adanya beberapa pola retakan yang cukup jelas pada beberapa bagian permukaan balok, baik pada sisi vertikal maupun horizontal.



Gambar 15. Tampak bawah pola retakan pada balok B_{ext} beserta ilustrasinya



Gambar 16. Tampak depan pola retakan pada balok B_{ext} beserta ilustrasinya

Pada Gambar 15 dan 16 terlihat retakan dengan arah vertikal hingga miring yang muncul di sekitar sambungan balok baja, dan teridentifikasi retakan yang memanjang sejajar arah balok, serta retakan miring yang menyebar pada sisi balok. Pola tersebut mengindikasikan karakteristik retak akibat gaya torsi, yang umumnya muncul akibat puntiran berlebih dan didukung dengan lemahnya pengekanan oleh tulangan transversal. Kondisi ini diperkuat dengan adanya pengamatan saat inspeksi lapangan, di mana retakan ditemukan berdekatan dengan lokasi sambungan antara struktur *mezzanine* baja dan balok B_{ext} seperti pada Gambar 16. Untuk menyimpulkan jenis keretakan yang terjadi pada balok B_{ext} , dilakukan perbandingan terlebih dahulu terhadap pola retakan dari studi literatur yang digunakan, yaitu seperti pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 5.

Hasil analisis penyebab retakan

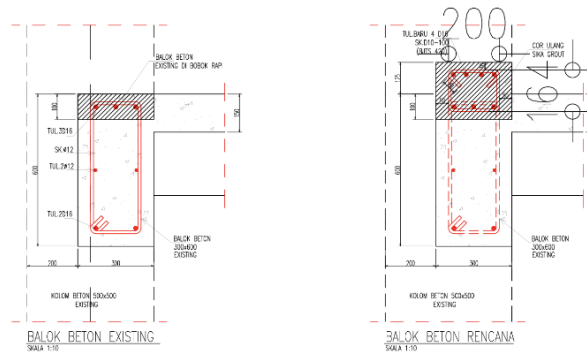
Berdasarkan hasil analisis gaya dalam dari pemodelan *software* struktural, dokumentasi kondisi aktual balok B_{ext} di lapangan, serta perbandingan pola retakan dengan referensi studi literatur, menunjukkan bahwa setelah pemasangan *mezzanine* baja pada struktur utama, terjadi peningkatan gaya dalam yang signifikan pada balok B_{ext} , terutama pada momen torsi, yaitu sebesar 354%. Kenaikan torsi yang ekstrem menjadi indikasi bahwa torsi merupakan gaya dominan yang mendorong terjadinya kerusakan pada balok, terlebih karena arah dan sebaran pola retakan di lapangan sangat sesuai dengan karakteristik retak akibat puntiran. Selain itu, ditemukan bahwa detail tulangan geser aktual tidak sesuai dengan gambar desain akhir, di mana jarak antar sengkang yang seharusnya 150mm ternyata dipasang dengan jarak 200mm di lapangan. Kondisi ini menyebabkan penurunan kapasitas torsi dan geser balok, sehingga struktur menjadi lebih rentan terhadap beban tambahan dari *mezzanine* baja. Dengan mempertimbangkan seluruh bukti yang mendukung, maka dapat disimpulkan bahwa kemungkinan penyebab utama retakan pada balok B_{ext} adalah kombinasi peningkatan beban torsi yang signifikan dan lemahnya pengekanan akibat ketidaksesuaian jarak tulangan sengkang dengan desain rencana.

Metode perbaikan yang cocok

Untuk mengatasi kerusakan struktural dan memulihkan kembali kapasitas balok seperti semula, dilakukan kajian terhadap dua metode perbaikan yang dapat secara efektif meningkatkan kapasitas yang dibutuhkan balok beton bertulang. Kajian ini difokuskan pada metode yang relevan dan umum diterapkan dalam kasus kerusakan yang serupa. Dua metode perbaikan yang dievaluasi dalam penelitian ini adalah "*Jacketing Beton*" dan "*Ferrocement*", yang masing – masing dianalisis dari segi kesesuaian teknis, metode pelaksanaan, estimasi biaya dan waktu.

Metode *jacketing* beton bertulang

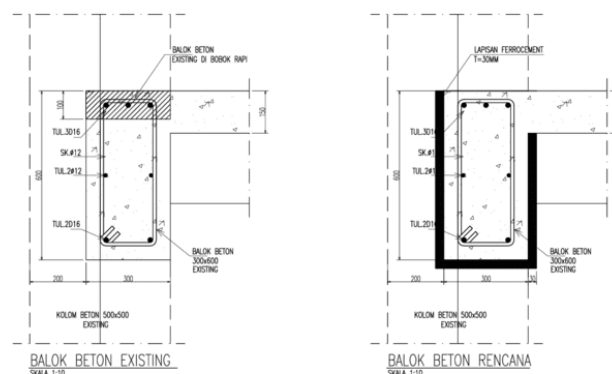
Perbaikan dengan metode *jacketing* pada balok dilakukan di bagian atas balok, dengan menambah ketinggian 125mm, dengan tulangan longitudinal ulir diameter 16mm sebanyak 4 buah, dan tulangan sengkang ulir diameter 10mm per jarak 100mm. Pada Gambar 19 merupakan perbandingan antara penampang balok eksisting dan balok rencana hasil perbaikan dengan *jacketing*. Penambahan dimensi *jacketing* pada balok B_{ext} didesain bukan hanya untuk meningkatkan kapasitas struktural, namun juga disesuaikan dengan kebutuhan elevasi lantai *mezzanine* baja. Meskipun penambahan dimensi *jacketing* pada balok B_{ext} mengikuti kondisi di lapangan, perhitungan struktur tetap dilakukan untuk memastikan bahwa kapasitas balok hasil perbaikan dapat menahan gaya – gaya dalam yang terjadi. Dengan demikian, desain perbaikan melalui *jacketing* ini memenuhi dua aspek utama, yaitu kebutuhan struktural untuk meningkatkan kapasitas pada balok, dan juga kebutuhan fungsional yang merupakan penyesuaian elevasi terhadap lantai *mezzanine*.



Gambar 17 Perbandingan desain balok B_{ext} eksisting dengan desain rencana

Metode *ferrocement*

Menurut jurnal yang telah disebutkan sebelumnya, metode ini dianggap efektif untuk meningkatkan kapasitas balok sebesar 60%, terhadap beban puntir atau gaya torsi tergantung pada jumlah lapisan dan posisi perkuatan. Namun, metode *ferrocement* tidak dirancang untuk menambah kekuatan struktur balok dalam menahan beban lentur yang besar atau gaya geser utama. Sehingga, metode ini lebih cocok digunakan pada balok yang mengalami kerusakan akibat torsi, atau sebagai solusi tambahan untuk memperkuat balok yang retaknya masih tergolong ringan hingga sedang. Jika melihat kondisi balok B_{ext} yang menunjukkan pola retakan akibat torsi, dan mempertimbangkan ruang kerja yang terbatas di lapangan, maka metode ini dapat menjadi pilihan yang efisien dan praktis, terutama jika waktu pelaksanaan terbatas atau struktur tidak memungkinkan dilakukan pengecoran beton ulang secara menyeluruh.



Gambar 18. Perbandingan dimensi balok B_{ext} awal dengan balok B_{ext} setelah ditambah dengan metode *ferrocement*

Sehingga berdasarkan Gambar 20, terdapat perubahan dimensi balok B_{ext} dengan dimensi ukuran awal 300x600mm menjadi 360x630mm. Pada metode ini, lapisan *ferrocement* dibuat menggunakan campuran mortar dengan rasio semen:pasir:air sebesar 1:2.5:0.3 dan ditambahkan sebesar 20% bahan aditif *Styrene Butadiene Rubber* (SBR) *latex* dari total berat semen, agar meningkatkan daya lekat mortar terhadap permukaan beton lama. Sebagai tulangan tambahan, digunakan *wire mesh* galvanis dengan diameter 3mm, jarak antar kawat 20mm, lalu dipasang sebanyak 3 lapis di tiga sisi balok. Jaring kawat diposisikan di atas *spacer* (cakar ayam) dengan tinggi 10mm, agar tidak langsung menempel pada permukaan beton dan menjaga ketebalan lapisan mortar secara merata. Untuk pembungkus tiga sisi, ujung bebas *wire mesh* diamankan menggunakan *strip* pengikat logam sehingga tetap stabil selama proses plesteran dilakukan.

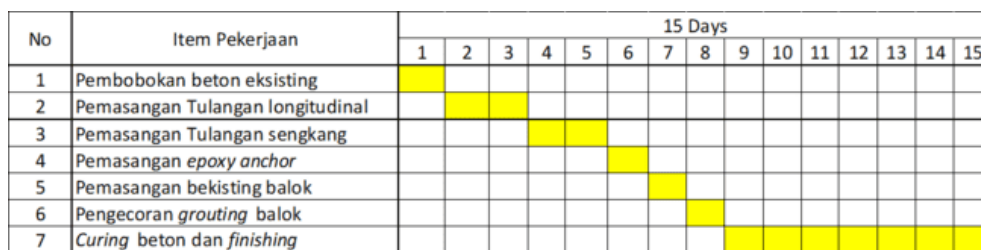
Estimasi biaya dan waktu pelaksanaan metode *jacketing* beton bertulang

Estimasi dibuat berdasarkan perhitungan kebutuhan material utama, volume pekerjaan, serta estimasi waktu pelaksanaan untuk masing-masing metode perbaikan. Sehingga dapat dilakukan perbandingan antara kedua metode perbaikan tersebut, untuk menentukan metode mana yang efisien dan sesuai dengan kondisi eksisting bangunan. Dari hasil perhitungan volume tiap masing-masing *item* pekerjaan, agar memperoleh estimasi biaya yang akurat dan sistematis, dilakukan perhitungan yang telah dilampirkan pada tabel-tabel sebelumnya, dilakukan perhitungan akhir estimasi biaya yang ditampilkan pada Tabel 2 sebagai Rencana Anggaran Biaya (RAB).

Tabel 2. Rincian volume dan satuan pekerjaan metode perbaikan *jacketing*

No	Pekerjaan	Vol	Sat	Harga (Rp)	Total Harga (Rp)
1	Pembobokan beton 5,5x0,3x0,1m	11,55	m ²	333.300	3.849.615
2	Besi Beton 4D16 BJTS420	51,44	kg	27.125	1.395.310
3	Besi Beton D10-100 BJTS420	28,92	kg	27.125	784.455
4	HIT-RE 500 V3 <i>Epoxy Anchor</i>	8	Titik	108.100	864.800
5	Bekisting Balok	2,06	m ²	281.600	580.096
6	<i>Grouting</i> Balok Tebal 22,5cm	0,37	m ³	8.000.000	2.960.000
				TOTAL (Rp)	10.434.276

Setelah menentukan hasil estimasi biaya, dilakukan pula analisis estimasi waktu pelaksanaan berdasarkan urutan tahapan teknis pekerjaan metode *jacketing*. Rencana waktu disusun dalam bentuk *bar chart* seperti pada Gambar 21 yang berisi lama pekerjaan tiap *item* pekerjaan dan alur kerja nya agar pelaksanaan pekerjaan di lapangan dapat dilakukan secara berurutan dan efisien.



Gambar 19. *Bar chart* pelaksanaan metode perbaikan *jacketing*

Estimasi biaya dan waktu pelaksanaan metode *ferrocement*

Dari hasil perhitungan volume tiap masing-masing *item* pekerjaan, agar memperoleh estimasi biaya yang akurat dan sistematis, dilakukan perhitungan biaya dari masing-masing pekerjaan yang telah dilampirkan pada Tabel 3 sebagai Rencana Anggaran Biaya (RAB).

Tabel 3. Rencana anggaran biaya (RAB) metode perbaikan *ferrocement*

No	Pekerjaan	Vol	Sat	Harga (Rp)	Total Harga (Rp)
1	Pembersihan permukaan balok	8,25	m ²	287.500	2.370.625
2	Pemasangan <i>wire mesh</i> Ø3 inc. spacer 10mm	24,75	m ²	244.000	6.039.000
3	Mortar Semen Rasio 1:2.5:0.3 + SBR 20%	0,2475	m ³	9.206.250	2.273.945
4	Perataan & <i>Finishing</i> permukaan	8,25	m ²	110.000	907.500
5	<i>Curing</i> mortar	8,25	m ²	212.500	1.753.125
				TOTAL (Rp)	13.345.145

Rekomendasi metode perbaikan yang digunakan

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, telah dilakukan studi terhadap dua alternatif metode perbaikan balok akibat retakan struktural yang terjadi pada balok B_{ext}, yaitu *jacketing* beton bertulang dan *ferrocement wrapping*. Masing-masing metode memiliki kelebihan dan keterbatasan, baik dari segi teknis pelaksanaan, efisiensi biaya, maupun waktu pengerjaan. Perbandingan kedua metode ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Perbandingan metode *jacketing* beton bertulang dan *ferrocement wrapping*

Kriteria	<i>Jacketing</i> Beton	<i>Ferrocement Wrapping</i>
Estimasi Biaya	Rp. 10.434.276	Rp. 13.345.145
Estimasi Waktu Pelaksanaan	15 hari	8 hari
Penambahan Kapasitas Struktural	Meningkatkan torsi, lentur, dan geser	Dominan menambah kapasitas torsi

Dari Tabel 14, dapat dilihat bahwa metode *Ferrocement wrapping* memiliki keunggulan dalam efisiensi waktu dan kepraktisan pemasangan, namun hanya memberikan penguatan signifikan terhadap gaya torsi saja. Sementara itu, metode *jacketing* beton meskipun membutuhkan waktu pelaksanaan lebih lama dan yang lebih berat, metode ini dapat memberikan peningkatan kapasitas struktural secara menyeluruh, yaitu terhadap gaya lentur, geser, dan torsi secara bersamaan. Selain itu, metode *jacketing* ini juga lebih unggul dibandingkan metode *ferrocement* karena dimensi nya yang sejajar dengan elevasi lantai *mezzanine*, sehingga hasil akhir dari perbaikan ini tidak mengganggu tata letak lantai maupun elemen arsitektural lainnya.

Sehingga, berdasarkan hasil evaluasi teknis dan kondisi aktual di lapangan, maka metode yang direkomendasikan untuk digunakan sebagai perkuatan balok B_{ext} adalah "Metode *Jacketing* Beton bertulang".

Metode ini dinilai lebih kuat dan aman karena mampu meningkatkan kapasitas balok dalam menahan berbagai gaya dalam secara komprehensif, tidak hanya torsi. Selain itu, metode *jacketing* beton dipilih karena penyesuaian dimensi penampang balok yang segaris dengan elevasi lantai *mezzanine*, sehingga tidak menimbulkan deviasi ketinggian antara lantai baru dan struktur eksisting.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis numerik menggunakan *software* struktural menunjukkan bahwa balok B_{ext} mengalami peningkatan gaya dalam secara signifikan setelah pemasangan *mezzanine* baja. Peningkatan momen lentur sebesar 245,8%, gaya geser sebesar 274,7%, dan gaya torsi sebesar 354% mengindikasikan bahwa balok menerima beban melebihi kapasitas rencananya. Oleh karena itu, balok tidak mampu menahan beban tambahan tersebut tanpa mengalami kerusakan struktural.

Keretakan balok B_{ext} disebabkan oleh peningkatan gaya geser dan torsi serta ketidaksesuaian pelaksanaan di lapangan, di mana jarak sengkang aktual (200 mm) lebih besar dari rencana (150 mm), sehingga kapasitas balok lebih rendah dan tidak mampu menahan beban tambahan dari *mezzanine*.

Metode perbaikan yang diusulkan adalah metode *jacketing* karena dapat meningkatkan kapasitas struktural pada balok secara menyeluruh, dan lebih murah dari segi biaya walaupun pelaksanaan lebih lama dibandingkan metode *ferrocement*.

Estimasi total biaya yang dibutuhkan untuk metode *jacketing* beton bertulang adalah sebesar Rp. 10.434.276 dengan waktu pelaksanaan 15 hari.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. American Concrete Institute.
- Al-Osta, M. A., Khan, U., Baluch, M. H., & Rahman, M. K. (2018). Effects of Variation of Axial Load on Seismic Performance of Shear Deficient RC Exterior BCJs. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0277-0>
- Alzabidi, S. M., Diao, G., Abadel, A. A., Sennah, K., & Abdalla, H. (2023). Rehabilitation of reinforced concrete beams subjected to torsional load using ferrocement. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02433.
- Ghafur, A. (2009). *Pengaruh Penggunaan Abu Ampas Tebu Terhadap Kuat Tekan Dan Pola Retak Beton (Kajian Eksperimental)*. Universitas Sumatera Utara.
- Hidayati, N. (2022). Evaluasi dan Perkuatan Struktur Kolom Beton Bertulang Akibat Kebakaran. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 24(1), 1–9.
- Intan, R. P., & Cahyono, M. S. D. (2024). Perkuatan Struktur Balok Penopang Kolom Transfer Rumah Tinggal 3 Lantai yang Retak Akibat Getaran. *Jurnal Teknik Sipil UNPAL*, 14(1), 69–86.
- Isneini, M. (2009). Kerusakan dan perkuatan Struktur beton bertulang. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Universitas Lampung*, 13(3), 140016.
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2015). *Design of reinforced concrete*. John Wiley & Sons.
- Nawy, E. G. (2010). *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach*. Pearson.
- Ryu, E., Shin, Y., & Kim, H. (2018). Effect of Loading and Beam Sizes on the Structural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Under and After Fire. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 54. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0280-5>
- Saputra, A. G., Taran, R., Sudjarwo, P., & Buntoro, J. (2014). Identifikasi Penyebab Kerusakan pada Beton dan Pencegahannya. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 3(2).
- Taha, R., Allaf, M. A., & Tarsha, I. (2024). Experimental and Analytical Evaluation to Strengthened RC Beams Using Ferrocement Under Torsion. *Steps For Civil, Constructions and Environmental Engineering*, 2(3), 9–17.