

Pemodelan Elemen Hingga Balok Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Metode *Deep Embedment*

Wan Muhammad Nurhud¹⁾, Ridwan²⁾, Alfian Kamaldi²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau,

Kampus Bina Widya J. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Corresponding Author : ridwan@eng.unri.ac.id

ABSTRACT

The shear capacity of existing reinforced concrete structures is often unable to meet existing requirements. This decrease in strength can be caused by increased load, strong shear that is inadequate in initial design and material damage due to natural factors. Many methods that have been done are by means of external bonded (EB) method and near-surface mounted (NSM) method. However, shear resistance using the EB and NSM methods is prone to structural failures due to the magnification of this method only to contain an epoxy attachment and its blanket. To overcome this problem, the resistance method using deep embedment (DE) method have been proposed to reinforcement the shear capacity of existing reinforced concrete structures. The resistance using DE method is the strengthened shear capacity in kernel of reinforced concrete beams. The purpose of this study was to analyze the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened by the DE method through finite element modeling. In this research, the existing reinforced concrete structures put up the reinforcement by implant three kinds of steel carcass with 200 mm each gaps spread out shear beam. The maximum load result obtained from finite element analysis on reinforced concrete beams reinforced by the DE method was 31.81 kN. While the maximum deflection results obtained in finite element analysis was 8.32 mm. The failure model that occurs in the beam which is strengthened from the results of finite element analysis is the bending collapse.

Keywords: *shear reinforcement, deep embedment method, finite element model, shear capacity, reinforced concrete beams*

A. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang kian pesat sangat berpengaruh pada perkembangan di segala bidang termasuk dalam pembangunan infrastruktur. Pesatnya perkembangan tersebut berdampak pula pada pembangunan fisik, salah satunya adalah pembangunan konstruksi jembatan. Jembatan merupakan bangunan konstruksi teknik sipil yang berfungsi untuk menghubungkan suatu daerah dengan daerah yang lain.

Meningkatnya beban lalu lintas, lingkungan yang agresif atau desain konstruksi awal yang buruk pada jembatan, mengakibatkan balok pada jembatan

mengalami penurunan kekuatan, baik kekuatan lentur maupun kekuatan geser. Kapasitas geser dari struktur beton bertulang yang ada seringkali tidak dapat memenuhi persyaratan saat ini. Penurunan kekuatan ini dapat disebabkan oleh peningkatan beban, ketentuan geser yang tidak memadai dalam desain awal dan kerusakan material akibat faktor alam (Valerio dan Darby, 2009).

Untuk mengatasi kekurangan kuat geser balok beton bertulang tersebut, banyak metode perkuatan yang telah dilakukan yaitu dengan cara metode *external bonded* (EB) dan metode *near-surface mounted* (NSM). Perkuatan geser

dengan metode EB adalah perkuatan dengan menempelkan pelat baja atau lembaran *fiber reinforced polymer* (FRP) ke permukaan beton. Sedangkan perkuatan geser dengan metode NSM adalah perkuatan dengan menambahkan tulangan atau lembaran FRP ke dalam alur yang sudah disiapkan pada selimut beton (Chaallal et al., 2011). Perkuatan geser menggunakan metode EB dan NSM ini rentan terhadap kegagalan struktur karena perkuatan metode ini hanya mengadakan lekatan epoksi dan selimut betonnya, sehingga terlepasnya material FRP dari permukaan beton. Untuk mengatasi masalah ini, metode perkuatan dengan metode *deep embedment* (DE) diusulkan untuk untuk perkuatan geser pada balok beton bertulang (Challal et al.,; Mofidi et al. 2012). Perkuatan dengan metode DE adalah perkuatan geser yang diperkuat di inti balok beton bertulang. DE adalah metode perkuatan dengan cara menambahkan tulangan geser pada penampang beton.

Seiring dengan majunya perkembangan teknologi komputer, studi numerik menjadi salah satu cara untuk mendapatkan informasi yang tidak dapat diperoleh dari pengujian eksperimental. Maka penelitian ini akan membahas tentang bagaimana pengaruh dari penambahan tulangan yang ditanam pada penampang balok melalui pemodelan elemen hingga.

B. TINJUAN PUSTAKA

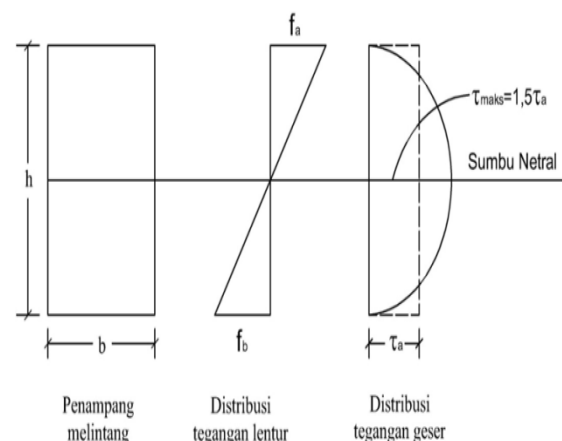
B.1 Perilaku Geser Balok Beton Bertulang

Kuat geser balok beton bertulang akan bertambah dengan dipasangnya tulangan geser. Sebelum terjadinya retak diagonal, tulangan geser memberikan kontribusi yang kecil terhadap kuat geser beton. Namun setelah terbentuknya retak diagonal, tulangan geser memberikan kontribusi terhadap kuat geser beton, dan redistribusi gaya internal terjadi pada daerah penampang yang retak. Bila jumlah tulangan geser kecil, maka kegagalan yang

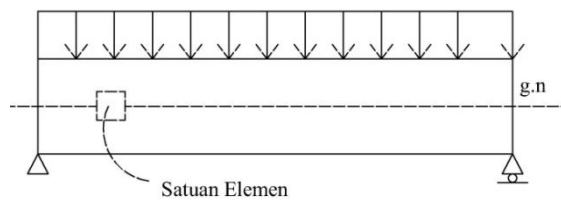
terjadi diakibatkan oleh lelehnya tulangan geser. Sedangkan bila luas tulangan geser yang digunakan cukup besar, maka ada kemungkinan terjadinya kegagalan geser-tekan yang tidak bersifat duktail dan harus dihindari (Setiawan, 2016).

Perilaku balok beton bertulang pada keadaan runtuh karena geser sangat berbeda dengan pada keruntuhan karena lentur. Balok tersebut langsung hancur tanpa adanya peringatan terlebih dahulu. Juga retak diagonalnya jauh lebih besar dibandingkan dengan retak lentur. Geser juga merupakan parameter yang sangat berarti pada perilaku braket (*brackets*), korbil (*corbel*) dan balok tinggi (Nawy, 2010).

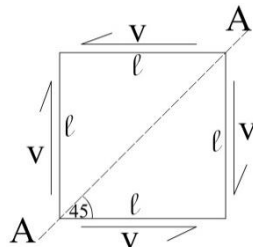
Distribusi tegangan lentur dan tegangan geser sesuai teori elastisitas untuk balok homogen ditunjukkan dalam Gambar 1. Tegangan lentur dihitung dari persamaan lentur $f = Mc/I$, sedangkan tegangan geser maksimum terjadi pada sumbu netral yang besarnya sama dengan $1,5\tau_a$ (tegangan geser rata-rata), dengan $\tau_a = V/bh$. Dengan f adalah tegangan lentur, M adalah momen lentur pada penampang, c adalah jarak dari sumbu netral ke tegangan normal, I adalah momen inersia, τ_a adalah tegangan geser rata-rata, V adalah gaya geser, b adalah lebar penampang balok dan h adalah tinggi balok.



Gambar 1. Tegangan Geser dan Lentur pada Balok Persegi (Setiawan, 2016)



(a). balok dengan beban merata



(b). tegangan pada satuan elemen

Gambar 2. Hubungan Antar-Tegangan Geser (Dipohusodo, 1994)

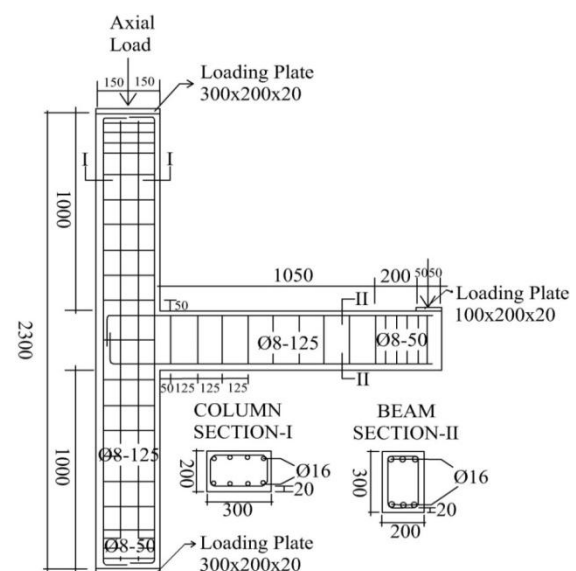
Dari Gambar 2 dilakukan pengamatan suatu satuan elemen kubus tepat pada garis netral balok dimana $f = 0$. Berdasarkan prinsip keseimbangan, tegangan geser vertikal pada dua muka vertikal besebrangan akan sama besar akan tetapi arah kerjanya berlawanan. Apabila hanya kedua tegangan tersebut yang timbul dan bekerja dapat dipastikan bahwa elemen akan berputar. Maka dari itu, untuk mempertahankan keseimbangan harus ada tegangan geser yang bekerja pada permukaan horizontal yang besarnya sama tetapi arahnya berlawanan terhadap tegangan geser vertikal.

B.2 Perkuatan Geser Balok beton bertulang dengan Metode *Deep Embedment* (DE)

Perkuatan geser dengan metode *deep embedment* (DE) adalah metode perkuatan dengan tulangan baja tertanam di dalam lubang balok yang telah disiapkan secara vertikal untuk memperkuat kapasitas geser balok beton bertulang. Teknik perkuatan metode DE memberikan efektifitas penguatan yang lebih tinggi karena teknik ini mengandalkan transfer langsung tegangan dari tulangan baja ke inti beton, tidak seperti teknik perkuatan dengan metode

EB dan NSM. Selain itu, persiapan permukaan beton dan perlindungan terhadap api dan vandalisme tidak diperlukan (Rahman et al., 2018).

Teknik perkuatan metode DE ini sudah pernah dilakukan oleh Ridwan et al., (2018) pada sambungan balok kolom eksterior yang diberi beban siklik. Tujuh spesimen sambungan balok kolom eksterior dibuat. Sketsa benda uji dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Detail Benda Uji Sambungan Balok Kolom (Ridwan et al., 2018)

Satu spesimen sambung balok kolom eksterior dibuat sesuai aturan ACI 352R-02 sementara enam spesimen lainnya dirancang dengan aturan pra-1970 untuk mewakili kondisi struktur yang direncanakan dengan perkuatan lama. Semua spesimen memiliki dimensi dan konfigurasi penulangan yang sama. Untuk mempelajari pengaruh jenis tulangan, tulangan baja dan CFRP digunakan sebagai tulangan geser tambahan. Jumlah tulangan geser yang ditambahkan juga bervariasi untuk mempelajari pengaruh rasio tulangan tambahan.

Hasil penelitian menunjukkan metode perkuatan DE dapat mengubah mekanisme keruntuhan benda uji dari keruntuhan geser menjadi keruntuhan lentur. Selain itu, benda uji yang diperkuat dengan metode DE, terjadi peningkatan

kuat geser, daktilitas dan kekuatan masing-masing sebesar 21%, 93% dan 35% dibandingkan benda uji kontrol.

B.3 Perangkat Lunak Elemen Hingga

Metode elemen hingga/*finite element method* (FEM) adalah prosedur numerik untuk memperoleh solusi permasalahan yang ditemukan dalam analisis teknik. Metode elemen hingga mengkombinasikan beberapa konsep matematika untuk menghasilkan sistem linier ataupun nonlinier. Metode elemen hingga, dalam penyelesaian masalah menggunakan pendekatan diskretisasi elemen untuk menemukan perpindahan titik simpul/joint/grid dan gaya-gaya di struktur. Beberapa paket elemen hingga tersedia untuk memudahkan proses membangun dan menyelesaikan sebuah model, seperti Vector2, DIANA dan ABAQUS. Di bagian ini, ringkasan penelitian yang dilakukan pada balok beton bertulang yang diperkuat menggunakan perangkat lunak elemen hingga.

Perangkat lunak ABAQUS adalah salah satu program untuk menganalisis elemen hingga yang memfokuskan pada pemodelan sebuah elemen. Program ini menyediakan pemodelan dan visualisasi lingkungan yang lengkap serta input model material yang cukup lengkap. Program elemen hingga ABAQUS menyediakan program yang digunakan untuk memodelkan benda yang akan dianalisis yang diberi nama ABAQUS CAE. ABAQUS mempunyai fasilitas CAD/CAM/CAE yang bisa difungsikan sebagai program analisis elastis dan plastis. Keunggulan ABAQUS dibanding dengan program lain sejenis adalah lengkapnya menu yang tersedia pada part module (Hastomo 2009).

B.4 Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang Menurut SNI 03-2847-2013

Adapun persamaan-persamaan untuk penulangan geser menurut SNI 03 - 2847 - 2013, adalah :

$$V_u \leq \phi V_n \quad (1)$$

atau

$$V_u \leq \phi(V_c + V_s) \quad (2)$$

dengan : V_u : gaya geser terfaktor (kN)

V_c : kekuatan geser yang disumbangkan oleh beton (kN)

V_s : kekuatan geser yang disumbangkan oleh tulangan (kN)

ϕ : faktor reduksi (0,6)

V_n : kekuatan geser nominal (kN)

Untuk komponen struktur yang menahan geser dan lentur saja, gaya geser dapat disumbangkan oleh beton (V_c) dapat dihitung :

$$V_c = \left(\frac{1}{6} \sqrt{f'_c} \right) b_w \cdot d \quad (3)$$

Untuk gaya geser yang disumbangkan oleh sengkang vertika (V_s) SNI 03-2847-2013 menganggap retak diagonal membentuk sudut 45° terhadap sumbu panjang balok, V_s dapat dihitung dengan persamaan :

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S} \quad (4)$$

Dengan : s : Jarak pusat ke pusat batang tulangan geser ke arah sejajar tulangan pokok penampang (mm)

f_y : kuat leleh tulangan geser (MPa)

C. METODE PENELITIAN

C.1 Deskripsi Benda Uji

Benda uji yang dianalisis pada penelitian ini adalah balok beton bertulang yang diperkuat dengan metode DE. Ukuran penampang balok yang dianalisis adalah 150 mm x 250 mm dan panjang total balok adalah 2000 mm. Benda uji menggunakan dua buah tulangan baja polos diameter 12 mm untuk tulangan lentur bawah dan dua buah tulangan baja

polos diameter 6 mm untuk tulangan lentur atas. Untuk menghindari kerusakan geser akibat konsentrasi tegangan pada tumpuan dan posisi beban titik maka diberikan tulangan geser diameter 6 mm. Kuat tekan beton rencana dalam analisis adalah 18 MPa.

Benda uji ini diperkuat dengan menggunakan metode *deep embedment*. Tiga buah tulangan polos diameter 12 mm ditambahkan di daerah bentang geser. Jarak tulangan EB pertama dipasang pada jarak 100 mm dari tumpuan. Kemudian tulangan EB ke 2 dan ke 3 dipasang pada jarak masing masing 200 mm. Posisi pemasangan tulangan *embedded bars*, dapat dilihat pada Gambar 4.

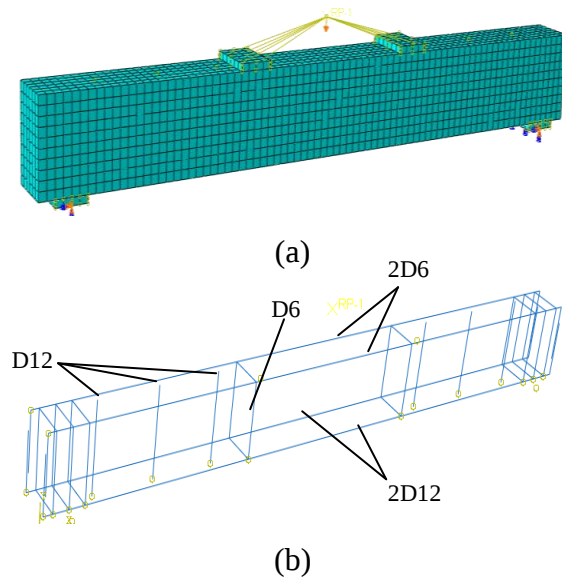
C.2 Pemodelan Balok dengan Perangkat Lunak Elemen Hingga

Balok beton bertulang dimodelkan dengan menggunakan aplikasi berbasis elemen hingga. Pada tahap ini dilakukan pemodelan balok dan input propertis material beton maupun baja. Beton dimodelkan menggunakan elemen solid yang memiliki 8 titik nodal dengan tipe C3D8R. Sedangkan tulangan baja dimodelkan menggunakan elemen 1D dengan 2 titik nodal dengan tipe T3D2.

Model material beton yang digunakan yaitu model *Concrete Damage Plasticity* (CDP). Model material CDP ini menggabungkan plastisitas kerusakan isotropik dengan konsep pelastisitas pengerasan. Evolusi kerusakan beton dalam model bahan ini ditelusuri oleh regangan plastik serta tarik dan tekan yang masing-masing terkait dengan tegangan dan kegagalan tekan.

Kriteria hasil Von Mises dalam hubungannya dengan respons pengerasan isotropik digunakan untuk menggambarkan respons material baja tulangan di luar titik lelehnya. Hingga menghasilkan, baja asumsikan elastis linier, dengan modulus Young sama dengan 200 GPa dan rasio Poisson sama dengan 0,3. Sifat-sifat penguat, yaitu tegangan leleh, tegangan ultimit dan modulus elastisitas, ditentukan

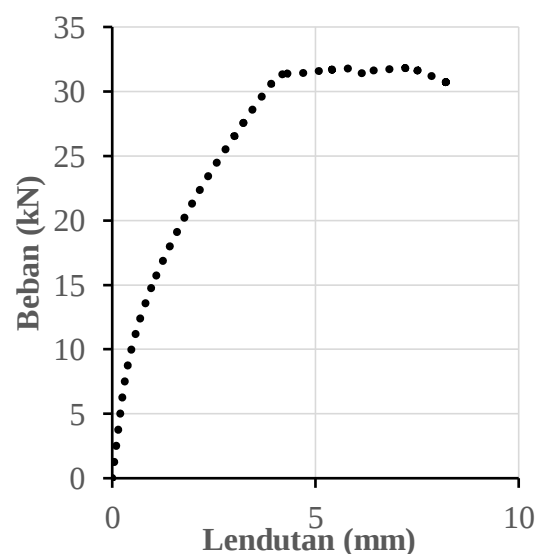
dari data tegangan-regangan pengujian tarik dan kurva tegangan-regangan teknik pengerasan tegangan-regangan-elastis-plastik trilinear. Model elemen hingga yang dimodelkan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. (a) Pemodelan Balok dan Pelat Tumpuan; (b) Pemodelan Tulangan dan Perkuatan Balok

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.3 Hasil Analisis Balok Beton Bertulang yang Diperkuat Menggunakan Elemen Hingga



Gambar 5. Kurva Hubungan Beban Lendutan Balok yang Diperkuat

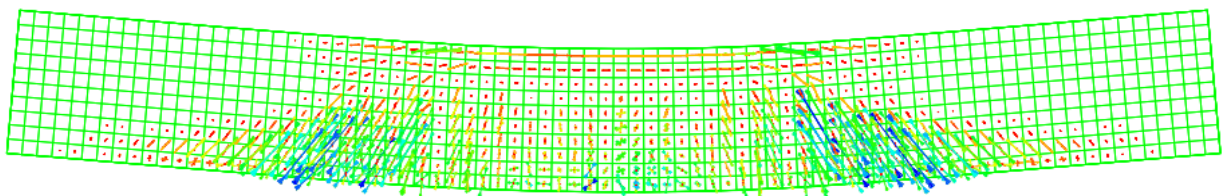
Gambar 5 menunjukkan beban maksimum nilai yang dicapai pada analisis elemen hingga adalah 31,81 kN dengan lendutan sebesar 7,25 mm. Balok mengalami keruntuhan pada saat balok telah mencapai beban ultimate yang ditandai dengan berhentinya perhitungan dalam analisis elemen hingga. Kondisi akhir dari analisis elemen hingga diperoleh beban sebesar 30,67 kN dengan lendutan sebesar 8,32 mm.

D.2 Hasil Pola Retak Analisis Elemen Hingga

Model material beton yang digunakan dalam analisis elemen hingga pada balok beton bertulang yang diperkuat ini adalah *concrete damage plasticity* (CDP). Pola retak pada model material CDP dapat divisualisasikan dengan memplot nilai regangan tarik beton plastis (PE) pada arah sumbu utamanya (*principal direction*) seperti yang tampak pada

Gambar 6. Pemodelan elemen hingga yang dilakukan dapat memprediksi dengan baik pola retak yang terjadi pada balok beton bertulang yang diperkuat. Pada hasil analisis elemen hingga diperoleh beban saat retak pertama 5,63 kN dan lendutan sebesar 0,23 mm.

Model keruntuhan balok beton bertulang yang diperkuat mengalami keruntuhan lentur. Keruntuhan lentur terjadi diawali dengan adanya retak pada balok yang pertama di bagian tengah bentang. Meningkatnya beban, retak awal pada tengah bentang mulai merambat menuju sumbu netral penampang serta disertai dengan meningkatnya lendutan di tengah bentang. Hasil akhir dari keruntuhan balok yang terlihat bahwa konsentrasi regangan tarik beton yang terjadi dibentang geser tidak signifikan, balok juga sudah mulai terbentuk retak vertikal yang mengindikasikan terjadinya kerusakan lentur.



Gambar 6. Retak Balok yang Diperkuat Hasil Pemodelan Elemen Hingga

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

1. Beban dan lendutan maksimum yang terjadi pada balok yang diperkuat dengan metode *deep embedment* adalah 31,81 kN dan 8,32 mm.
2. Pola retak elemen hingga menunjukkan bahwa retak pertama terjadi di tengah bentang. Model keruntuhan balok pada elemen hingga mengalami keruntuhan lentur.

E.2 Saran

1. Diperlukan analisis lebih lanjut mengenai perkuatan geser balok beton bertulang dengan metode *deep embedment*

2. Penggunaan permodelan elemen hingga sangat berguna dalam menganalisis elemen suatu konstruksi karena dapat memecahkan masalah dalam analisis linier relatif sederhana sampai simulasi linier yang rumit dengan hasil yang akurat.

F. DAFTAR PUSTAKA

Chaallal, O., Asce, M., Mofidi, A., Benmokrane, B., Asce, M., Neale, K., & Asce, M. (2011). Embedded Through-Section FRP Rod Method for Shear Strengthening of RC Beams : Performance and Comparison with Existing Techniques. *Jurnal Of Composites*

- For Contruction*, 15(3), 374–383.
- Dipohusodo, I. (1994). Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03.
- Hastomo, Budi. 2009. “Analisis Pengaruh Sifat Mekanik Material Terhadap Distribusi Tegangan Pada Proses Deep Drawing Produk End Cup Hub Body Maker Dengan Menggunakan Software Oktober 2009.” Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Mofidi, A., Chaallal, O., Benmokrane, B., & Neale, K. (2012). Experimental Tests and Design Model for RC Beams Strengthened in Shear Using the Embedded Through-Section FRP Method. *Journal of Composites for Construction*, 16(5), 540–550.
- Nawy, E.G., (2010). Beton bertulang Suatu Pendekatan Dasar, PT. Refika Aditima, Bandung, 40254
- Rahman, R., Dirar, S., Jemaa, Y., & Theofanous, M. (2018). Experimental Behavior and Design of Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Joints Strengthened with Embedded Bars, 22(6), 1–15.
- Setiawan, A. (2016). *Perencanaan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2013*. (L. Simarmata, Ed.). Erlangga.
- SNI 03 - 2847 - 2013. 2013. “Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung.” Retrieved
- Valerio, P., & Darby, A. P. (2009). Deep embedment of FRP for concrete shear strengthening. *Ice*, 162(5), 311–321.