

ARTICLE

Perkuatan Balok Beton Bertulang Yang Mengalami Kegagalan Geser Menggunakan Metode Deep Embedment

Fahmuji Kurniawan, Alfian Kamaldi, Enno Yuniarso, and Ridwan*

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Riau Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas KM 12.5, Pekanbaru 28293

*Corresponding author. Email: ridwan@eng.unri.ac.id

(Received 7 April 2023; revised 22 April 2023; accepted 26 April 2023; first published online 12 Mei 2023)

Abstract

Bridges are infrastructure buildings that are commonly used and very functional in everyday. One of the structural components of the bridge is a reinforced concrete beam as a load bearer that will be forwarded to the foundation. The shear capacity of reinforced concrete beam structures sometimes cannot meet the existing requirements. This can be caused by increased loads, inadequate shear strength in the initial design and material damage due to natural factors. There are several methods that have been carried out to overcome the decrease in shear strength in beam structures, namely reinforcement methods by externally bonded (EB) and near-surface mounted (NSM). In reality, shear reinforcement with EB and NSM methods in implementation only relies on epoxy adhesion and concrete blankets, which still causes structural failure. The deep embedment strengthening method (DE) can be proposed as a shear reinforcement for reinforced concrete beams to overcome the previous problems. Reinforcement with DE method is a shear reinforcement that is reinforced in the core of reinforced concrete beams. This research was conducted by embedding 8 reinforcements vertically with a distance of 200 mm along the shear span. In this study, finite element modeling was carried out using ABAQUS. The results of finite element modeling with the DE method showed that the maximum load was 30.646 kN and the maximum deflection was 13.00 mm. The collapse model that occurs from finite element modeling on test specimens with DE reinforcement experiencing flexural failure.

Keywords: reinforced concrete beam, shear strengthened, deep embedment method, ABAQUS

1. Pendahuluan

Semakin maju teknologi suatu peradaban maka harus diikuti dengan perkembangan dalam bidang apapun. Salah satunya ialah dalam bidang pembangunan infrastruktur jembatan. Maka dari itu dibutuhkan inovasi terbaru dalam dunia konstruksi guna membantu dalam pembangunan infrastruktur yang lebih maju.

Balok merupakan elemen struktur yang sangat penting di suatu konstruksi. Hal ini dikarenakan balok harus mampu menahan gaya lentur maupun gaya geser. Pada balok beton bertulang yang banyak dipakai dalam struktur, didapati beberapa kasus tidak memenuhi kapasitas geser dari balok

beton bertulang, penurunan kualitas akibat dari peningkatan beban, ketentuan geser yang tidak memadai dalam desain awal dan kerusakan material akibat faktor alam (Valerio, Ibell, and Darby 2009).

Banyak metode perkuatan yang telah dilakukan untuk mengatasi kekurangan kuat geser balok beton bertulang, diantaranya metode external bonded (EB) dan metode near-surface mounted (NSM). Jenis perkuatan dengan metode EB adalah perkuatan dengan menempel 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 (Challaal *et al.* 2011).

Metode perkuatan external bonded (EB) dan metode near-surface mounted (NSM) rentan terhadap kegagalan struktur karena perkuatan metode ini hanya mengandalkan lekatkan atau lem epoksi pada selimut betonnya, sehingga akan mudah lepasnya material FRP dari permukaan beton. Untuk mengatasi masalah ini, metode perkuatan dengan metode deep embedment (DE) diusulkan untuk perkuatan geser pada balok beton bertulang (Mofidi *et al.* 2012). Maka salah satu metode baru yang dapat mengatasi kekurangan kuat geser balok beton bertulang ialah dengan menerapkan metode DE. Metode DE merupakan metode perkuatan dengan cara penambahan tulangan geser pada penampang beton. Maka pada penelitian ini akan dikaji tentang kekuatan geser beton balok bertulang yang diperkuat dengan menambahkan tulangan vertikal pada penampang balok beton.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 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 daktail dan harus dihindari (Setiawan 2016). Selain menerima momen lentur, pada saat yang sama balok juga menahan gaya geser akibat lentur. Kondisi kritis geser akibat lentur ditunjukkan dengan munculnya tegangan-tegangan tarik tambahan di tempat-tempat tertentu pada komponen struktur terlentur. 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), korbel (corbel) dan balok tinggi (Nawy 1998).

Retak miring akibat geser di badan balok beton bertulang dapat terjadi tanpa disertai retak akibat lentur di sekitarnya, atau dapat juga sebagai kelanjutan proses retak lentur yang telah mendahulunya. Retak miring pada balok yang sebelumnya tidak mengalami retak lentur dinamakan sebagai retak geser badan. Retak geser badan juga dapat terjadi di sekitar titik balik lendutan atau pada tempat dimana terjadi penghentian tulangan balok struktur bentang menerus. Retak miring yang terjadi sebagai proses kelanjutan dari retak lentur yang telah timbul dari sebelumnya dinamakan sebagai retak geser lentur. Proses terjadinya retak geser lentur umumnya cenderung merambat dimulai dari tepi masuk ke dalam balok dengan arah hampir vertikal (Dipohusodo 1996).

Pada balok beton bertulang tunggal, distribusi tegangan geser di atas sumbu netral berbentuk kurva parabolik. Di bawah sumbu netral, tegangan geser maksimum besarnya tetap hingga posisi tulangan tarik. Tegangan geser di bawah tulangan tarik adalah nol seperti terlihat pada Gambar 2.6. Distribusi tegangan geser untuk balok bertulang rangkap dan balok beton penampang T ditunjukkan pada Gambar 2.7, 2.8 dan 2.9. Khusus balok T dapat dilihat bahwa sebagian besar gaya geser yang dipikul oleh badan balok (Setiawan 2016).

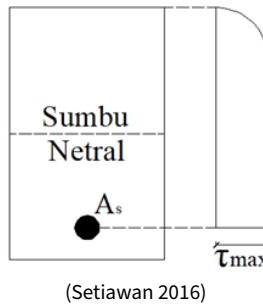


Figure 1. Distribusi Tegangan Geser pada Balok Beton Bertulang Tunggal

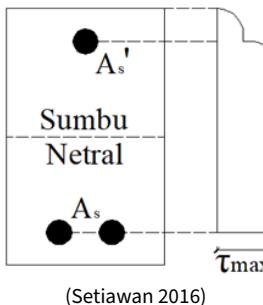


Figure 2. Distribusi Tegangan Geser pada Balok Beton Bertulang Rangkap

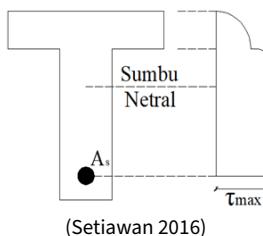


Figure 3. Distribusi Tegangan Geser pada Balok T Beton Bertulang Tunggal

2.2 Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang Menurut SNI 2847-2019

Adapun persamaan-persamaan untuk kekuatan geser menurut SNI 2847-2019 sebagai berikut :

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

atau

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

dengan V_u adalah gaya geser terfaktor (kN), V_c adalah kuat geser yang disumbangkan oleh beton (kN), V_s adalah kuat geser yang disumbangkan oleh tulangan (kN), ϕ faktor reduksi dan V_c adalah kuat geser nominal (kN).

Nilai V_c untuk komponen non prategang tanpa gaya aksial, nilai V_c dapat dihitung dengan persamaan :

$$V_{c(1)} = 0,17 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (3)$$

$$V_{c(2)} = \left(0,16 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) \times b_w \times d \quad (4)$$

$$V_{c(3)} = \left(0,16 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} + 17\rho_w \right) \times b_w \times d \quad (5)$$

$$V_{c(4)} = 0,29 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (6)$$

Penentukan kekuatan geser beton dapat digunakan nilai V_c yang paling kecil dari persamaan di atas. Nilai V_s pada komponen non prategang tulangan geser (sengkang) tertutup yang tegak lurus terhadap sumbu longitudinal komponen dapat dihitung dengan persamaan :

$$V_s = \frac{A_v \times f_{yt} \times d}{s} \quad (7)$$

dengan V_s adalah kuat geser yang disumbangkan oleh tulangan (kN), s adalah Jarak pusat ke batang tulangan geser ke arah sejajar tulangan pokok penampang (mm), f_{yt} adalah Kuat leleh tulangan geser (MPa), dan d adalah tinggi efektif balok (mm).

2.3 Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Menurut SNI 2847-2019

Persamaan-persamaan untuk kekuatan lentur menurut SNI 2847-2019 sebagai berikut :

$$\phi M_n \left[C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d_c) \right] > M_u \quad (8)$$

dengan M_u adalah gaya lentur terfaktor (kNm), M_n adalah gaya lentur nominal (kNm), ϕ faktor reduksi, d adalah jarak dari serat tekan penampang balok menuju ke tengah tulangan tarik (mm), d_c adalah jarak dari serat tekan penampang balok menuju ke tengah tulangan tekan (mm), a adalah jarak dari serat tekan penampang balok menuju ke garis netral (mm), C_c adalah Resultan gaya tekan pada beton (kN), dan C_s adalah resultan gaya tekan pada tulangan (kN).

Penampang balok beton bertulang didesain memiliki tulangan tarik dan tulangan tekan. Balok tersebut dinamakan sebagai balok bertulangan rangkap.

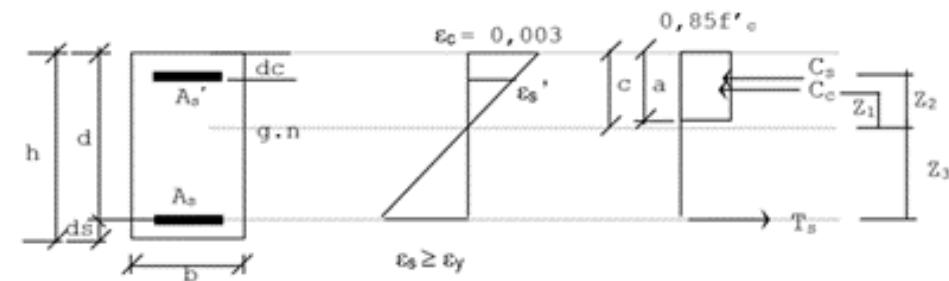


Figure 4. Distribusi Tegangan Lentur pada Penampang Balok Bertulangan Rangkap

2.4 Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang 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 externally bonded (EB) dan near surface mounted (NSM). Selain itu, persiapan permukaan beton dan perlindungan terhadap api dan vandalisme tidak diperlukan (Rahman et al. 2018).

Ridwan et al. 2019 melakukan penelitian untuk menentukan beban lendutan maksimum yang terjadi pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan metode deep embedment (DE), serta menentukan pola retak dengan pemodelan elemen hingga. Pada penelitian ini menggunakan metode dengan pembuatan benda uji yang diperkuat dengan metode DE. Penelitian ini juga menggunakan metode analisis untuk menentukan pola retak menggunakan perangkat lunak elemen hingga. Hasil penelitian menunjukkan beban dan lendutan maksimum yang terjadi pada balok yang diperkuat dengan metode DE adalah 31,82 kN dan 8,32 mm, pola retak pertama terjadi di tengah bentang. Model keruntuhan balok pada elemen hingga mengalami keruntuhan lentur.

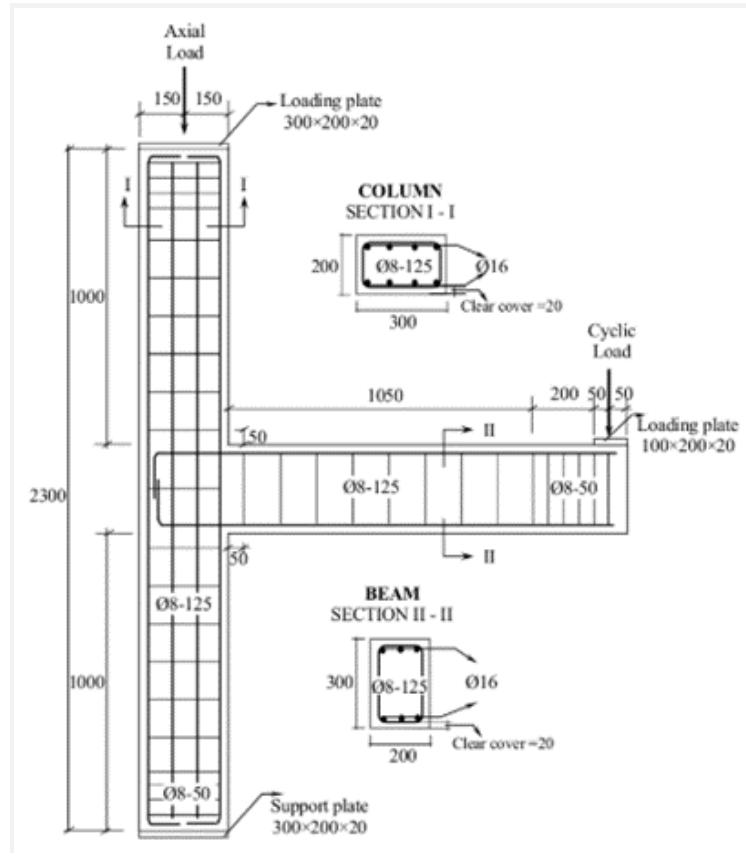
Ridwan et al. 2019 melakukan penelitian untuk membandingkan perilaku balok beton bertulang tanpa tulangan geser melalui studi eksperimental dan pemodelan elemen hingga. Metode yang digunakan pada penelitian ini metode eksperimental dan juga analisis yaitu pembuatan dan pengujian beban geser serta lendutan benda uji balok beton bertulang tanpa tulangan geser, sehingga hasilnya dibandingkan dengan analisis pemodelan elemen hingga. Hasil penelitian pemodelan elemen hingga menunjukkan bahwa beban maksimum yang diperoleh balok beton bertulang tanpa tulangan geser adalah 31,493 kN dengan lendutan sebesar 8,054. Sedangkan melalui pengujian eksperimental didapatkan beban maksimum 27 kN dan lendutan 12,53 mm. Jadi analisis menggunakan program elemen hingga memiliki beban maksimum yang lebih tinggi dan lendutan yang lebih kecil dibandingkan dari hasil pengujian eksperimental.

Berdasarkan penelitian Rahman et al. 2018 yang menggunakan tulangan baja konvensional sebagai jenis tulangan deep embedment (DE) dan tulangan carbon fiber reinforced polymer (CFRP) menunjukkan bahwa spesimen yang diperkuat menyebabkan peningkatan kekuatan geser sendi dan tegangan tarik utama yang dinormalisasikan pada beban puncak. Hal ini dikarenakan batang baja yang bersifat daktail dapat memperkuat spesimen dibandingkan menggunakan carbon fiber reinforced polymer (CFRP). Detail benda uji balok kolom beton bertulang (BCJs) dan gambar skema set-up alat pengujian di laboratorium dapat dilihat pada Gambar 5.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah metode perkuatan DE menunjukkan bahwa benda uji tanpa perkuatan mengalami keruntuhan geser sambungan berupa retak diagonal. Benda uji yang diperkuat dengan metode DE menunjukkan kegagalan getas yang lebih sedikit dimana kerusakan terjadi di daerah balok pada tahap awal pembebanan, menunjukkan permulaan mekanisme engsel balok. Selain itu, spesimen yang diperkuat menunjukkan peningkatan kekuatan geser sambungan, daktilitas, energi yang hilang dankekakuan masing-masing 6-21%, 6-93%, 10-54% dan 2-35% dibandingkan dengan spesimen kontrol.

2.5 Perangkat Lunak Elemen Hingga

Prosedur numerik untuk memperoleh solusi permasalahan yang ditemukan dalam analisis teknik dinamakan metode elemen hingga atau Finite Element Analysis (FEA). Finite Element Analysis (FEA) ini menggabungkan konsep matematika yang dapat menghasilkan sistem linier dan nonlinier. Metode elemen hingga menyelesaikan masalah dengan cara menemukan perpindahan titik simpul atau join atau grid dan gaya-gaya di struktur melalui pendekatan diskretisasi elemen. Elemen satu dimensi (garis), dua dimensi (bidang) dan tiga dimensi (solid) dapat digunakan untuk diskretisasi. Vector2, DIANA dan ABAQUS merupakan paket elemen yang disediakan untuk mempermudah menyele-



(Rahman et al. 2018)

Figure 5. Detail Benda uji Balok-Kolom Beton Bertulang

saikan sebuah model (Rahman et al. 2018). Metode elemen hingga yang digunakan dalam ringkasan penelitian yang dilakukan pada balok beton bertulang yang diberikan perkuatan menggunakan perangkat lunak ABAQUS.

ABAQUS adalah salah satu perangkat lunak yang berfungsi untuk menganalisa elemen dan memfokuskan pada pemodelan serta menyediakan visualisasi lengkap dengan input model material yang sangat baik. Selain itu, ABAQUS dapat digunakan untuk pemodelan benda yang akan dianalisa yaitu ABAQUS Computer Aided Engineering (CAE). Salah satu keunggulan perangkat lunak ABAQUS ini adalah penyediaan menu yang sangat lengkap pada part module (Hastomo 2009). Beberapa fasilitas yang dimiliki ABAQUS yaitu dapat menjadi program analisis elastis dan plastis, analisa Multiphysics dan pengembangan bahasa yang dapat digunakan sebagai proses simulasi dan analisis (ABAQUS 2014).

3. Metodologi Penelitian

3.1 Deskripsi Benda Uji Balok Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Metode deep embedment (DE)

Benda uji balok beton bertulang didesain agar mendapatkan hasil kapasitas geser yang lebih kecil dibandingkan kapasitas lentur. Oleh karena itu dengan kapasitas geser yang kecil benda uji balok beton bertulang akan mengalami keruntuhan geser. Benda uji yang akan diteliti dalam tugas akhir

ini adalah balok berukuran 150 mm x 250 mm dan panjang total 2000 mm. Ada dua jenis tulangan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu tulangan BJTP6 dan BJTP12. Tulangan yang digunakan untuk tulangan atas ialah BJTP 6 dan untuk tulangan bawah ialah BJTP 12 dan tulangan sengkang yang digunakan ialah BJTP6. Detail penulangan benda uji dapat dilihat pada Gambar 6 berikut ini.

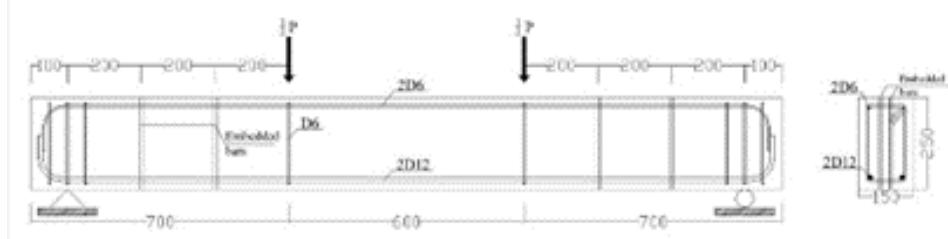


Figure 6. Detail penulangan benda uji beton bertulang

Benda uji balok beton bertulang pada penelitian ini diperkuat dengan menggunakan metode deep embedment (DE). Metode ini dilakukan dengan cara memasukkan tulangan polos diameter 8 mm secara vertikal disepanjang bentang geser pada balok beton bertulang. Jumlah tulangan perkuatan yang ditanamkan sebanyak 8 tulangan dan dipasang dengan jarak 200 mm antar tulangan perkuatan.

3.2 Pemodelan Balok Struktur Beton Bertulang dengan Perangkat Lunak Elemen Hingga

Program ABAQUS merupakan program dengan menu pemodelan sangat lengkap sehingga tidak perlu bantuan program lain untuk pemodelan benda uji. Untuk detail pemodelan benda uji pada program ABAQUS dapat dilihat pada flowchart berikut ini.

3.3 Pemodelan Balok dengan ABAQUS

Analisis elemen hingga pada tugas akhir ini dilakukan dengan menggunakan software ABAQUS untuk pemodelan. Pemodelan balok dilakukan dengan penginputan data berupa properti material baja dan material beton dengan data material baja dan material beton sesuai dengan sampel benda uji eksperimental yang dilakukan di laboratorium. Pemodelan tulangan baja menggunakan elemen ID dengan 2 titik nodal tipe T3D2, sedangkan pemodelan beton menggunakan elemen solid dengan 8 titik nodal tipe C3D8R.

Hasil yang didapatkan dari pengujian eksperimental di laboratorium akan dilakukan pemodelan berbasis elemen hingga untuk dilakukan analisis. Langkah pertama yang dilakukan dari analisis elemen hingga menggunakan program ABAQUS adalah memodelkan balok beton bertulang sedemikian rupa seperti kondisi eksisting yang dibuat pada pengujian eksperimental di laboratorium. Pada penelitian ini pemodelan dibuat secara grafis menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga dengan program ABAQUS CAE 6.11. Prosedur yang dilakukan pada program ABAQUS terdiri dari proses, analisis dan hasil model. Hasil dari program ABAQUS berupa nilai beban, lendutan dan pola retak.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Analisis Beban Maksimum dan Lendutan Maksimum Balok yang Diperkuat Metode Deep Embedment Menggunakan Elemen Hingga

Hasil yang didapatkan pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan metode deep embedment dari pemodelan menggunakan ABAQUS berupa beban (kN) dan lendutan (mm). Hasil yang diperoleh dari analisis perkuatan balok beton bertulang yang diperkuat mencapai beban ultimate yaitu 30,646 kN dan lendutan yang terjadi sebesar 8,469 mm. Keruntuhan balok dialami pada saat

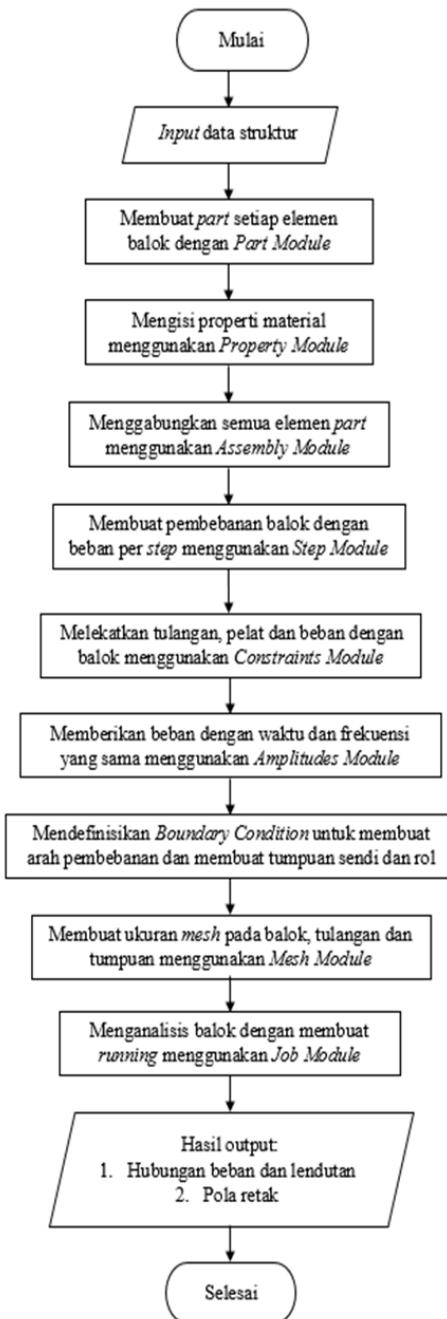


Figure 7. Bagan alir penelitian

balok telah mencapai beban ultimate yang ditandai dengan berhentinya perhitungan dalam analisis elemen hingga. Kondisi akhir dari analisis elemen hingga diperoleh beban sebesar 30,239 kN dengan lendutan sebesar 13 mm. Grafik beban dan lendutan maksimum dapat dilihat pada Gambar 8 berikut.

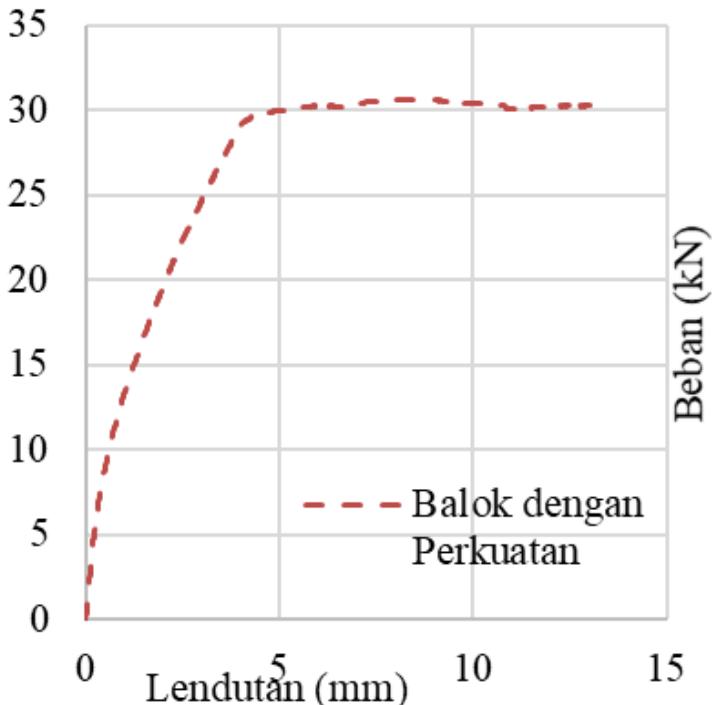


Figure 8. Beban dan Lendutan Maksimal Balok yang Diperkuat dengan Metode Deep Embedment

4.2 Hasil Analisis Pola Retak Balok yang Diperkuat Metode Deep Embedment Menggunakan Elemen Hingga

Pola retak yang dihasilkan dari pemodelan balok beton bertulang yang diperkuat dapat dilihat pada Gambar 8. Retak pertama yaitu ditandai dengan munculnya dua arah retak tegak lurus tepat pada bagian tarik di tengah bidang momen. 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 9,50 kN dan lendutan sebesar 0,55 mm.

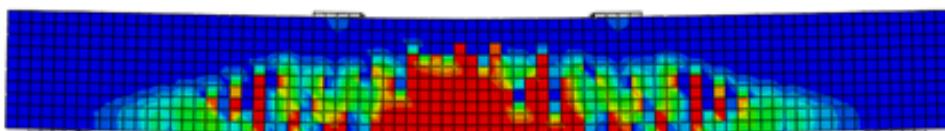


Figure 9. Pola Retak Balok yang Diperkuat pada elemen Hingga

Pola retak yang terjadi pada balok yang diperkuat terlihat balok mengalami keruntuhan karena lentur yang ditandai dengan retak yang terjadi hanya pada tengah bentang. Balok yang diperkuat dengan menggunakan metode Deep Embedment ini mampu untuk meningkatkan gaya geser balok beton bertulang. Retak lentur pada awal pembebanan mulai memanjang dan merambat menuju sumbu netral penampang serta disertai dengan meningkatnya lendutan di tengah bentang seiring meningkatnya beban luar. Retak vertikal akan terus menjalar ke daerah tekan balok sampai balok mengalami keruntuhan. Maka dapat disimpulkan balok yang diperkuat dengan metode Deep Embedment dapat mengubah mekanisme keruntuhan balok dari keruntuhan geser menjadi keruntuhan lentur.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari hasil analisis mengenai perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan menggunakan metode deep embedment (DE) pada elemen hingga dengan software ABAQUS sebagai berikut: Hasil pada analisis elemen hingga balok yang diperkuat dengan metode deep embedment beban dan lendutan maksimum yang dihasilkan adalah 30,646 kN dan 13,00 mm. Hasil model keruntuhan untuk balok yang diperkuat dengan metode deep embedment pada analisis elemen hingga mengalami keruntuhan lentur

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diharapkan dapat dilanjutkan oleh peneliti lain dengan memperhatikan beberapa saran sebagai berikut:

Diperlukan adanya analisis lebih lanjut mengenai perkuatan geser balok beton bertulang dengan metode Deep Embedment. Pemodelan elemen hingga menggunakan software ABAQUS sebaiknya dilakukan pada laptop maupun komputer dengan spesifikasi yang bagus agar tidak sering terjadi kegagalan dalam menjalankan aplikasi dan mendapatkan

References

- ABAQUS. 2014. *Analysis user's manual, version 6.14*. Dassault Systemes Simulia, Inc.
- Chaallal, O., A. Mofidi, B. Benmokrane, and K. Neale. 2011. Embedded through-section frp rod method for shear strengthening of rc beams: performance and comparison with existing techniques. *Journal of Composites for Construction* 15 (3): 374–383. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000174](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000174).
- Dipohusodo, Istimawan. 1996. *Struktur beton bertulang*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Hastomo, Budi. 2009. Analisis pengaruh sifat mekanik material terhadap distribusi tegangan pada proses deep drawing produk end cup hub body maker dengan menggunakan software abaqus 6.5-1. Skripsi, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Mofidi, Amir, Omar Chaallal, Brahim Benmokrane, and Kenneth W Neale. 2012. Performance and comparison of end-anchoraged systems for rc beams strengthened in shear with u-wrap frp. In *Proceedings of the 6th international conference on frp in civil engineering (cice2012)*. International Institute for FRP in Construction.
- Nawy, Edward G. 1998. *Beton bertulang : suatu pendekatan dasar*. Bandung: Refika Aditama.
- Rahman, Ridwan, Samir Dirar, Yaser Jemaa, Marios Theofanous, and Mohammed Elshafie. 2018. Experimental behavior and design of exterior reinforced concrete beam-column joints strengthened with embedded bars. *Journal of Composites for Construction* 22 (6): 04018047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000883](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000883).
- Ridwan, R, Alfan Kamaldi, Yaser Jemaa, Muhammad Rizki, Wan Muhammad Nurhud, and Alex Kurniawandy. 2019. Pemodelan balok beton bertulang yang diperkuat dengan metode deep embedment menggunakan software berbasis elemen hingga. In *Prosiding konferensi nasional teknik sipil ke-13 [konteks-13] : inovasi sains dan teknologi dalam penerapan infrastruktur berbasis mitigasi bencana dan berwawasan lingkungan*, edited by Benazir et al. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Unsyiah.
- Setiawan, Agustinus Agus. 2016. *Perancangan struktur beton bertulang*. Edited by Lemeda Simarmata. Surabaya: Erlangga.
- Valerio, P., T. J. Ibello, and A. P. Darby. 2009. Deep embedment of frp for concrete shear strengthening. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 162 (5): 311–321. <https://doi.org/10.1680/stbu.2009.162.5.311>.