

KAJIAN NUMERIK KINERJA GESER BALOK BETON BERTULANG DENGAN PERBAIKAN MENGGUNAKAN UPR-MORTAR (STUDI KASUS: BALOK DENGAN RASIO BENTANG GESER TERHADAP TINGGI EFEKTIF 3.08 DAN LOKASI PERBAIKAN DI TENGAH BENTANG GESER)

Inggrid Monalita, Halwan Alfisa Saifullah, Stefanus Adi Kristiawan

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami No. 36A, Kientingan, Surakarta 57126; Telp. (0271) 647069, Fax 634524
Email : halwan@ft.uns.ac.id

Abstract

Shear failure is one of failure modes in reinforced concrete structures that is avoided because its brittle manner and sudden collapse. Repair methods of damaged reinforced concrete beams have been evolved nowadays. Patching method using Unsaturated Polyester Resin (UPR) mortar may be the best alternative to enhance the shear capacity and recover the performance of reinforced concrete structure. This research method used numerical modeling non-linear finite element analysis with ATENA Engineering Cervenka Consulting software. This research includes verification towards experimental results, by which the numerical results are compared to the experimental results in terms of ultimate load value, maximum deflection, crack pattern, and failure mode that occurred. Furthermore, parametric study with variation of compressive strength, longitudinal reinforcement ratio, shear span to effective depth ratio, and tensile strength of UPR-Mortar are also conducted in this research to fulfill the numerical study on shear performance of reinforced concrete beams repaired with UPR-mortar. The verification results of ATENA modeling and the experimental method indicated an appropriate trend curve based on load-deflection graph and crack patterns that occurred. Parametric study results has shown that changes in those parameters can affect the shear behavior and performance of the beams.

Keywords: ATENA, Patching, Reinforced concrete beam, Shear capacity, UPR-mortar

Abstrak

Keruntuhan geser merupakan salah satu bentuk keruntuhan pada struktur beton bertulang yang sangat dihindari karena sifatnya yang getas dan terjadi secara tiba-tiba. Metode perbaikan struktur balok beton bertulang sudah banyak dikembangkan dewasa ini. Metode perbaikan patching menggunakan material *Unsaturated Polyester Resin* (UPR) Mortar dapat menjadi alternatif terbaik untuk meningkatkan kapasitas geser dan mengembalikan kinerja struktur beton bertulang. Metode penelitian menggunakan pemodelan numerik non-linear *finite element analysis* dengan perangkat lunak *ATENA Engineering Cervenka Consulting*. Penelitian ini mencakup verifikasi hasil eksperimen, dimana hasil dari analisis numerik ini dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimental, baik dari segi beban maksimum, lendutan maksimum, pola retak, dan modus keruntuhan yang terjadi. Lebih lanjut, studi parametrik berupa pengaruh variasi kuat tekan, rasio tulangan lentur, rasio bentang geser terhadap tinggi efektif, dan kuat tarik UPR-mortar juga dilakukan dalam penelitian ini untuk melengkapi kajian numerik kinerja geser balok beton bertulang dengan perbaikan menggunakan UPR-Mortar. Hasil penelitian menunjukkan kesesuaian pada *trend* kurva berdasarkan grafik beban-defleksi dan pola retak yang terjadi. Hasil studi parametrik menunjukkan bahwa perubahan pada parameter-parameter tersebut dapat mempengaruhi perilaku geser dan kinerja balok.

Kata Kunci : ATENA, Balok beton bertulang, Kapasitas geser, *Patching*, UPR-mortar

PENDAHULUAN

Salah satu bentuk keruntuhan atau kegagalan struktur beton bertulang adalah keruntuhan geser. Keruntuhan geser memiliki sifat yang getas (*brittle*) dan terjadi secara tiba-tiba yang tentunya kondisi ini sangat membahayakan. Lain halnya dengan kegagalan lentur yang sifatnya daktail, ditandai melalui peringatan berupa retak maupun defleksi/lendutan yang besar. Maka dari itu, dalam perencanaan konstruksi, elemen struktur harus didesain dan diperhitungkan sedemikian rupa sehingga menghasilkan kuat geser yang lebih besar dari yang diperlukan dan dipas-tikan agar keruntuhan lentur terjadi terlebih dahulu. Modifikasi modus keruntuhan tidak selalu mudah untuk dilakuk-kan, terutama untuk elemen struktur yang memang memiliki perilaku geser yang lebih dominan seperti *transfer beam*, *pile cap*, dan pelat tebal pada bangunan terowongan. Oleh karena itu, penelitian terkait perilaku geser struktur beton masih terus dibutuhkan.

Pada struktur yang mengalami degradasi kekuatan akibat kerusakan, kualitas dari perbaikan struktur sangat menentu-kan selain untuk peningkatan dari segi fungsional struktur, durabilitas, keamanan, kekakuan, juga berpengaruh dalam meningkatkan kapasitas geser struktur tersebut. Berbagai inovasi terkait peningkatan kapasitas geser balok

bertulang sudah banyak berkembang, salah satunya yaitu metode perbaikan *patching*. Penerapan metode perbaikan *patching* ini dianjurkan untuk mengatasi kerusakan akibat laju korosi pada struktur beton bertulang (*Japan Society of Civil Engineers*, 2007). Menurut penelitian Kristiawan, dkk (2017) yang menganalisis kegagalan geser pada balok bertulang dengan perbaikan *patching* menggunakan *Unsaturated Polyester Resin* (UPR-Mortar) menunjukkan terjadinya peningkatan kapasitas geser balok sebesar 14%. Selanjutnya, pada penelitian Kristiawan, dkk (2021) yang mencakup pengujian eksperimental dan simulasi numerik, terbukti bahwa UPR-Mortar dapat meningkatkan kuat geser dari balok beton bertulang sekitar 15-20% yang diuji secara eksperimental dimana kuat tarik UPR-mortar yang besar sangat berperan dalam menghambat perambatan retak diagonal. Adapun hasil dari simulasi numerik dengan menggunakan model balok yang sama pada berbagai rasio tulangan lentur menunjukkan level peningkatan kuat geser pada rasio tulangan lentur yang lebih besar. Selain itu, menurut James K. Wight dan MacGregor (*Reinforced Concrete Mechanics & Design*, 2012) perilaku geser pada struktur balok beton bertulang juga dipengaruhi oleh rasio a/d , dimana a adalah bentang balok yang menerima gaya geser yaitu jarak dari lokasi beban yang bekerja hingga ke tumpuan dan d adalah tinggi efektif penampang balok.

Dengan demikian, dalam penelitian ini dilakukan simulasi secara numerik untuk mengetahui kinerja geser balok beton bertulang yang diperbaiki dengan UPR-Mortar. Pemodelan numerik mengacu pada data spesifikasi material serta konfigurasi dan dimensi balok beton bertulang tanpa tulangan sengkang yang telah terlebih dahulu diuji secara eksperimental di laboratorium. Balok memiliki rasio bentang geser terhadap tinggi efektif 3.08 dan lokasi perbaikan tepat di tengah bentang geser. Simulasi dieksekusi ke dalam suatu *software* berbasis metode elemen hingga, ATENA *Engineering Cervenka Consulting*. Hasil dari analisis numerik ini kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimental, baik dari segi beban maksimum, lendutan maksimum, pola retak, dan modulus keruntuhan yang terjadi. Studi parametrik berupa variasi kuat tekan, rasio tulangan lentur, rasio bentang geser terhadap tinggi efektif, dan kuat tarik UPR-Mortar juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh parameter tersebut terkait kinerja geser balok beton bertulang.

Faktor yang Mempengaruhi Kuat Geser pada Balok Beton Bertulang

Balok beton bertulang tanpa tulangan geser badan akan mengalami kegagalan sesaat setelah terbentuknya retak miring. Oleh karena itu, nilai kapasitas geser balok dianggap sama dengan retak geser miring tersebut. James K. Wight dan MacGregor (*Reinforced Concrete Mechanics & Design*, 2012) menjelaskan beberapa faktor yang mempengaruhi kuat geser balok beton bertulang tanpa tulangan geser badan, diantaranya yaitu:

1. Kuat Tarik Beton

Beban retak miring merupakan fungsi dari kuat tarik dari beton f_{ct} . Retak lentur yang mendahului retak miring akan menghambat perluasan bidang tegangan elastis dimana retak miring terjadi pada tegangan tarik utama yang berkisar separuh dari nilai f_{ct} untuk penampang yang belum retak.

2. Rasio Tulangan Lentur

Kapasitas geser dari balok beton bertulang tanpa sengkang sebagai fungsi dari rasio tulangan didasarkan pada persamaan berikut:

$$\rho_w = \frac{A_s}{b_w d} \dots\dots\dots [1]$$

Keterangan :

- ρ_w = rasio tulangan lentur
- A_s = luasan tulangan lentur
- b_w = lebar balok
- d = tinggi efektif

Ketika rasio tulangan lentur bernilai kecil, retak lentur yang terjadi cenderung akan sangat intens dan menyebabkan bukaan yang lebih lebar dibandingkan dengan kasus balok dengan rasio tulangan lentur yang besar. Meningkatnya lebar retakan mengakibatkan penurunan nilai dari komponen gaya geser, V_d dan V_{ay} yang ditransfer oleh aksi pasak dari tulangan lentur di sepanjang retak miring. Alhasil, nilai tahanan geser pun akan berkurang dari yang disyaratkan untuk menahan geser yang terjadi sehingga balok akan mengalami kegagalan geser secara tiba-tiba.

3. Rasio Bentang Geser terhadap Tinggi Efektif

Rasio a/d akan mempengaruhi retak geser miring dan geser ultimit pada balok dengan $a/d < 2.0$, sedangkan pada balok dengan bentang geser yang lebih panjang, a/d memiliki pengaruh yang sedikit dalam retak geser miring dan dapat diabaikan.

4. Gaya Aksial

Gaya aksial tarik cenderung akan menurunkan beban retak miring, sementara gaya aksial tekan cenderung akan menaikannya. Saat gaya aksial tekan meningkat, permulaan terbentuknya retak lentur akan tertunda dan retak lentur tidak akan menembus jauh ke dalam balok. Kemudian, gaya aksial tarik secara langsung akan meningkatkan tegangan tarik yang menyebabkan regangan pada tulangan longitudinal. Hal tersebut menimbulkan adanya peningkatan pada lebar retak miring, lalu berakibat pada penurunan tegangan geser tarik maksimum yang dapat diteruskan di sepanjang retakan. Hal inilah yang menyebabkan beban runtuh akibat geser menurun.

Mekanisme Transfer Geser

Mekanisme transfer geser pada balok beton bertulang terbagi menjadi dua macam, yakni *beam shear carrying action* dan *arching action*. *Beam shear carrying action* terdiri dari lima hal penting yang menjadi dasar mekanisme transfer gaya geser, antara lain sebagai berikut:

1. *Uncracked Concrete in The Compression Zone*

Adanya perlawanan geser oleh beton yang belum mengalami retakan. Daerah beton yang belum terjadi retak ini memiliki kontribusi menahan geser dalam suatu komponen struktur beton bertulang. Besarnya tahanan geser ini dipengaruhi oleh ketinggian daerah tekan-lentur balok.

2. *Aggregate Interlocking*

Munculnya perlawanan geser dari aksi ikatan antar agregat beton sepanjang permukaan beton kasar/bidang retak diagonal. Kontribusi dari gaya ikat antar agregat ini akan menurun seiring dengan retak yang terus melebar dan ukuran agregat yang semakin mengecil.

3. *Dowel Action of The Longitudinal Reinforcement*

Adanya perlawanan aksi pasak dari tulangan longitudinal terhadap gaya transversal. Retak *splitting* pada tulangan longitudinal menyebabkan kontribusi *dowel action* menurun.

4. *Residual Tensile Stresses*

Setelah terjadinya retakan, beton masih bisa menahan tarik. Tegangan residual muncul pada daerah yang sedang mengalami proses fraktur.

5. *Stirrups*

Pada saat retak diagonal terbentuk, tulangan sengkang akan memberikan tahanan geser dan semakin menurun kontribusinya saat mulai terjadi *yield*.

Arching action (aksi pelengkung) mirip dengan mekanisme analogi rangka batang. *Arching action* merupakan sumbangan dari kuat tekan beton dan berperan penting dalam mekanisme transfer gaya geser terutama pada balok tinggi dimana rasio bentang geser a terhadap tinggi efektif d tidak terlalu besar. Gaya geser sebagian besar akan diteruskan secara langsung ke tumpuan oleh busur tekan dan busur tarik berupa tulangan lentur, tulangan sengkang, dan tulangan lain yang diperlukan akan berperan sebagai elemen pengikat yang mengambil seluruh tegangan tarik yang terjadi.

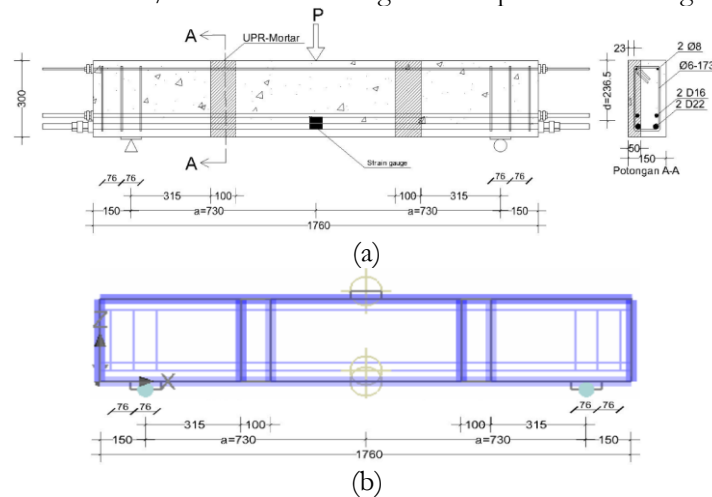
Software ATENA Engineering Červenka Consulting

Dalam penelitian ini, pemodelan balok beton bertulang dilakukan menggunakan *software* ATENA 3D berbasis metode elemen hingga yang dirancang secara khusus untuk menganalisis atau melakukan simulasi perilaku struktural beton bertulang termasuk retakan, keruntuhan, dan lelehnya tulangan (*User's Manual for ATENA 3D*, 2017).

METODE

Metode yang diterapkan pada penelitian ini berupa pemodelan numerik *Non-linear Finite Element Analysis* (NLFEA). Simulasi dieksekusi ke dalam suatu *software* berbasis metode elemen hingga, 3D ATENA Engineering Červenka Consulting. Pemodelan numerik mengacu pada data spesifikasi material serta konfigurasi dan dimensi balok beton bertulang tanpa tulangan sengkang yang telah terlebih dahulu diuji secara eksperimental di laboratorium. Penelitian ini menggunakan benda uji berupa beton normal dan perbaikan dengan UPR-Mortar berbentuk balok berukuran 15 cm x 30 cm x 176 cm tanpa tulangan sengkang. Perbaikan geser balok menggunakan UPR-Mortar berukuran 100 x 50 x 300 mm dilakukan pada lokasi sejarak 365 mm dari titik pembebanan. Keseluruhan balok tersebut didesain untuk mengalami keruntuhan geser.

Material beton dan UPR-Mortar dalam penelitian ini dimodelkan dalam *fracture-plastic constitutive model* dengan *material type CC3DNonlinCementitious2* dimana perilaku *nonlinear* dijelaskan berdasarkan *uniaxial stress-strain law for concrete*. Model konstitutif tulangan mengikuti perilaku elastis-plastis sempurna dan didefinisikan melalui hubungan tegangan-regangan yang diterapkan yaitu, *bilinear with hardening*. Pembebanan pada balok berupa *load control system* yang diaplikasikan dengan laju pembebanan 5 kN setiap *step*-nya. *Solution parameter* yang digunakan yaitu *Arc-Length Method* agar *solution path* yang dihasilkan tetap konstan dalam mengamati hubungan beban - lendutan secara penuh (ATENA Program Documentation Part 1 Theory, 2016). Adapun proses batas iterasi yang digunakan adalah sebanyak 40 iterasi. Pada gambar berikut, terlihat *outline* dari benda uji dari balok eksperimen dan balok hasil pemodelan *software* ATENA yang memiliki rasio a/d sebesar 3.08 dengan lokasi perbaikan di tengah bentang geser.



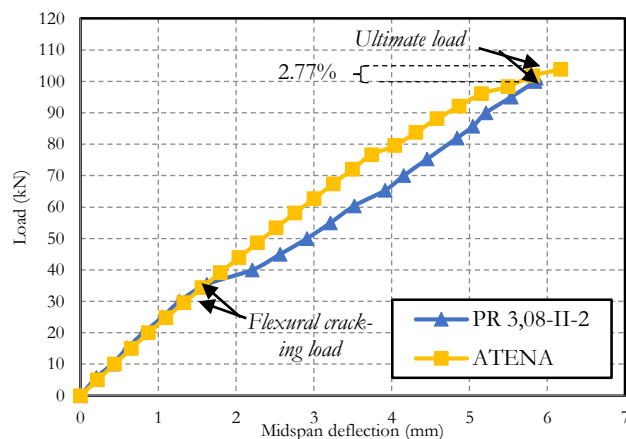
Gambar 1. Model benda uji: (a) balok eksperimen; (b) balok simulasi numerik

Meshing yang digunakan adalah *Brick* dengan ukuran sebesar 50 x 50 mm. *Material properties* yang digunakan menyesuaikan hasil pengujian eksperimental, seperti kuat tekan karakteristik kubus sebesar 17 MPa dan UPR-Mortar sebesar 61 MPa, sedangkan nilai input parameter lainnya menggunakan nilai *default* dari ATENA. Dalam menentukan kurva *load-deflection*, akan dilakukan peninjauan pada dua titik utama, yakni titik pertama untuk memantau lendutan yang terletak di tengah bawah balok dan titik kedua untuk memantau *ultimate load* (beban maksimum) yang terletak di atas *steel plate* di tengah atas balok dimana beban diaplikasikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

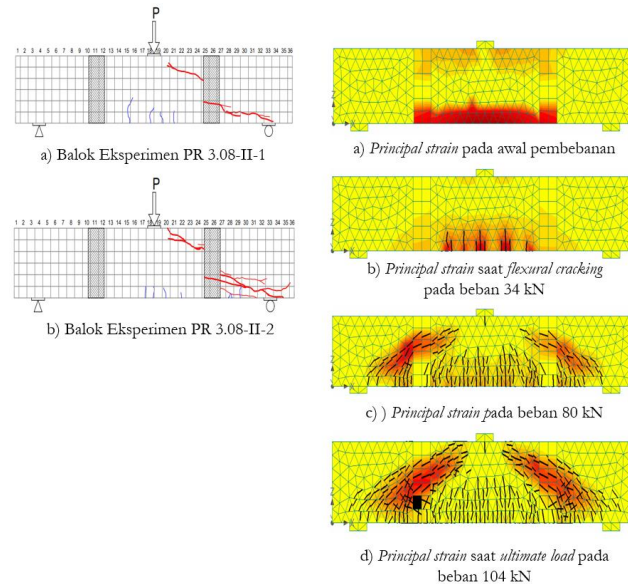
Verifikasi Pengujian Eksperimental

Hasil analisis pemodelan ATENA yang telah diperoleh kemudian diverifikasi dengan hasil pengujian eksperimen. Hasil data diolah dan dipresentasikan dalam bentuk grafik *load-deflection* sebagai berikut.



Gambar 2. Perbandingan grafik *load-deflection* pemodelan ATENA dengan eksperimen balok PR 3.08-II

Berdasarkan gambar di atas terlihat bahwa pada balok perbaikan tanpa sengkang (PR), hasil numerik mampu menahan beban maksimal 2.77% lebih besar dibandingkan dengan balok hasil pengujian eksperimental. Apabila ditinjau dari segi *displacement* saat *ultimate load* terdapat perbedaan antara hasil numerik dengan eksperimen sekitar 5.30%. Hal ini mengindikasikan bahwa simulasi numerik yang dilakukan menggunakan *software* ATENA memiliki tingkat keandalan yang cukup baik dalam memodelkan perilaku balok beton bertulang runtuh geser yang diperbaiki menggunakan material UPR-Mortar. Adapun hasil analisis pemodelan ATENA berupa pola retak ditampilkan pada Gambar 3.

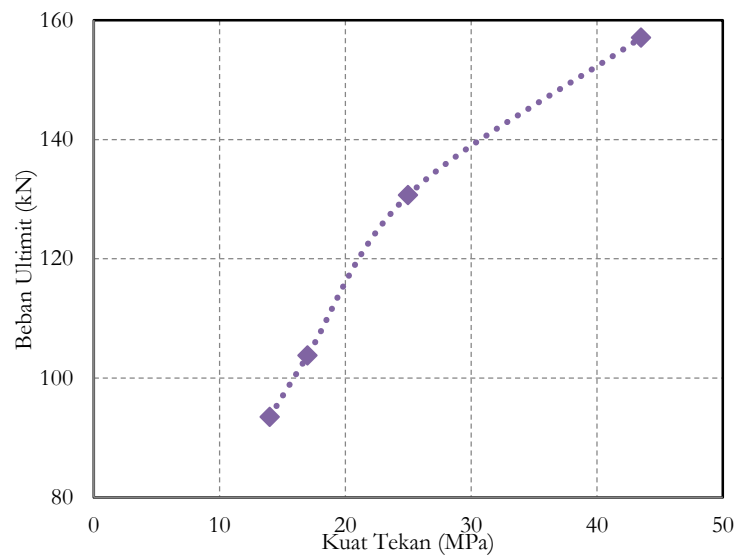


Gambar 3. Pola retak balok PR hasil pengamatan eksperimen dan hasil prediksi ATENA

Berdasarkan hasil pola retak yang telah didapatkan, terlihat bahwa pada tahap awal pembebanan tidak ditemukan retak pada balok perbaikan tanpa sengkang (PR). Saat mulai terjadi retak, muncul retak lentur vertikal dan regangan yang terkonsentrasi di tengah bentang dimana momen lentur terbesar terjadi pada daerah ini. Pada beban sekitar 80 kN, terjadi retak diagonal yang menghubungkan titik pembebanan (*loading point*) dan tumpuan (*support points*). Sangat menarik untuk diperhatikan, pada level pembebanan ini dapat dilihat bahwa di daerah beton yang mengalami perbaikan *patching*, regangan yang terjadi tidak terlalu besar dan retak yang terbentuk juga tidak terlalu banyak jika dibandingkan dengan beton yang tidak diberi perbaikan *patching*. Hal ini dapat disebabkan oleh kuat tarik UPR-mortar yang besar sehingga intensitas retak yang terjadi pada daerah perbaikan tidak terlalu banyak. Akhir dari pembentukan retak geser ini, yaitu pada *ultimate load state*, menentukan jenis keruntuhan yang terjadi pada balok PR adalah kegagalan geser.

Hasil Analisis Pemodelan Parameter 1 (Variasi Kuat Tekan)

Perubahan parameter 1 yaitu berupa variasi kuat tekan dengan nilai *default* sebesar 17 MPa yang divariasikan menjadi 14 MPa, 26 MPa, dan 43.5 MPa. Hasil analisis berupa grafik parameter 1 (variasi kuat tekan) ditampilkan pada Gambar 4 berikut ini.

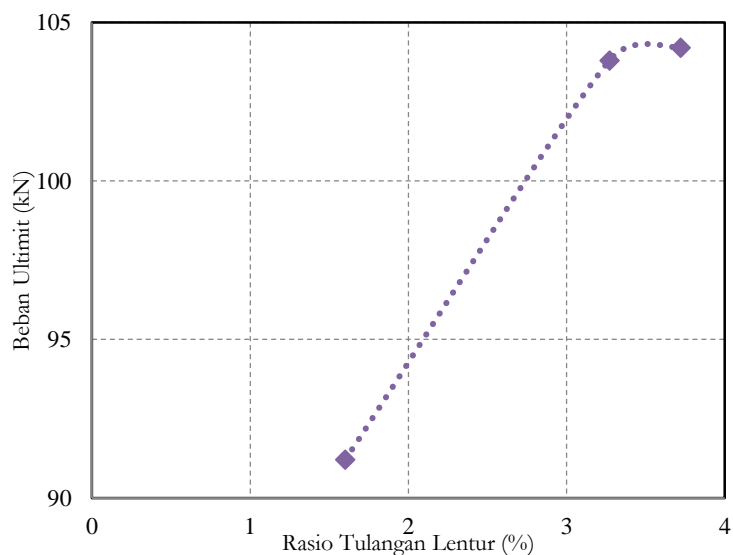


Gambar 4. Rekapitulasi hasil pemodelan numerik dengan perubahan parameter kuat tekan balok

Gambar di atas menunjukkan bahwa kuat tekan (F_{cu}) memiliki korelasi positif terhadap kuat geser beton, yaitu semakin tinggi kuat tekan akan semakin besar pula kuat geser yang dapat ditahan oleh beton. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa balok perbaikan (PR) mengalami level peningkatan beban ultimit yang sangat signifikan seiring bertambahnya kuat tekan balok. Laju peningkatan kuat geser cukup besar sampai kuat tekan beton tertentu dan laju peningkatan kuat geser mengalami penurunan setelah itu.

Hasil Analisis Pemodelan Parameter 2 (Variasi Rasio Tulangan Lentur)

Perubahan parameter 2 yaitu berupa variasi rasio tulangan lentur dengan nilai *default* sebesar 3.27% yang divariasikan menjadi 1.60% dan 3.72%. Hasil analisis berupa grafik parameter 2 (variasi rasio tulangan lentur) ditampilkan pada Gambar 5 berikut ini.

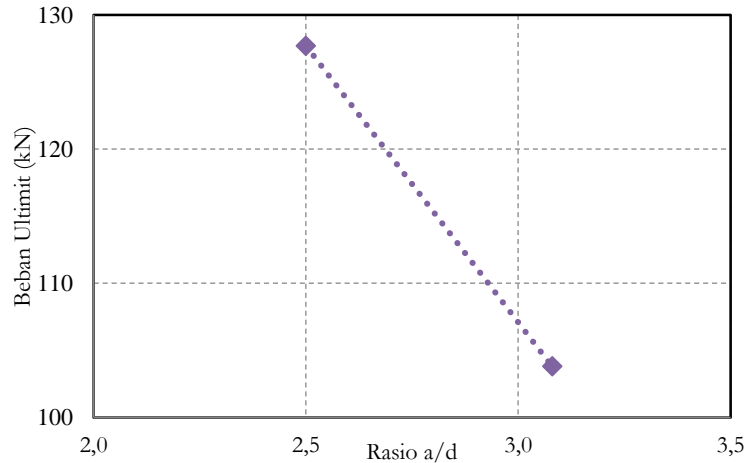


Gambar 5. Rekapitulasi hasil pemodelan numerik dengan perubahan parameter rasio tulangan lentur

Gambar 5 menunjukkan bahwa peningkatan rasio tulangan lentur dapat meningkatkan kapasitas geser balok beton bertulang yang diperbaiki dengan UPR-Mortar. Akan tetapi, peningkatan kapasitas geser menjadi tidak lagi signifikan dengan semakin besarnya rasio tulangan lentur.

Hasil Analisis Pemodelan Parameter 3 (Variasi Rasio Bentang Geser terhadap Tinggi Efektif)

Perubahan parameter 3 yaitu berupa perubahan rasio a/d dengan nilai *default* rasio sebesar 3.08 dan divariasikan menjadi 2.5. Hasil analisis berupa grafik parameter 3 (variasi rasio a/d) ditampilkan pada Gambar 6 berikut ini.

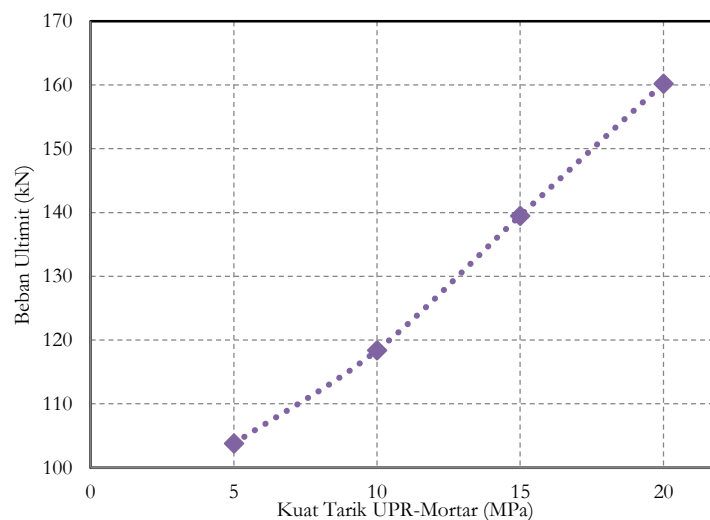


Gambar 6. Rekapitulasi hasil pemodelan numerik dengan perubahan parameter rasio bentang geser terhadap tinggi efektif

Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa semakin besar rasio a/d , beban ultimit yang terjadi akan semakin mengecil dan dapat dikatakan bahwa peningkatan rasio a/d dapat menurunkan kapasitas geser dari balok beton bertulang. Hal ini disebabkan karena perubahan mekanisme transfer geser dari *arching action* menjadi *beam-shear carrying action* dimana aksi balok akan menjadi dominan dan mode kegagalan yang terjadi akan semakin mengarah pada kegagalan lentur.

Hasil Analisis Pemodelan Parameter 4 (Variasi Kuat Tarik UPR-Mortar)

Perubahan parameter 4 yaitu berupa perubahan pada nilai kuat tarik dari UPR-Mortar. Nilai kuat tarik UPR-Mortar *default* yaitu sebesar 5 MPa berdasarkan pengujian eksperimental, kemudian divariasikan menjadi 10 MPa, 15 MPa, dan 20 MPa. Hasil analisis berupa grafik parameter 4 (variasi kuat tarik UPR-Mortar) ditampilkan pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Rekapitulasi hasil pemodelan numerik dengan perubahan parameter kuat tarik UPR-Mortar

Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa pada masing-masing balok, semakin besar kuat tarik UPR-Mortar yang diaplikasikan, beban ultimit yang mampu ditahan oleh balok akan semakin meningkat. Hal ini berkaitan dengan kemampuan UPR-Mortar dalam memulihkan kekuatan balok dengan mengurangi tegangan tarik yang terjadi akibat pembebanan. Pengaplikasian UPR-Mortar ini juga dapat meminimalisasi retak, terutama pada daerah yang diberi perbaikan, serta mengurangi lendutan yang terjadi pada balok. Dengan demikian, dari grafik tersebut dapat dikatakan bahwa besarnya kuat tarik UPR-Mortar berpengaruh terhadap kapasitas geser dari balok beton bertulang.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dijabarkan, diperoleh kesimpulan bahwa hasil verifikasi analisis pemodelan ATENA dengan hasil eksperimen memiliki *trend* kurva yang sesuai berdasarkan grafik *load-deflection*. Hal ini mengindikasikan bahwa simulasi numerik yang dilakukan menggunakan *software* ATENA memiliki tingkat keandalan yang cukup baik dalam memodelkan perilaku balok beton bertulang runtuh geser yang diberi perbaikan UPR-Mortar. Pola retak yang dihasilkan antara hasil eksperimen dan hasil analisis numerik menunjukkan kesesuaian dengan jenis keruntuhan yang dialami adalah keruntuhan geser. Dari hasil studi parametrik variasi kuat tekan, rasio tulangan lentur, rasio bentang geser terhadap tinggi efektif, dan kuat tarik UPR-Mortar dapat disimpulkan bahwa parameter-parameter tersebut memiliki pengaruh terhadap kinerja geser pada kasus balok beton bertulang dengan rasio a/d 3.08 dengan perbaikan UPR-Mortar seperti yang diamati dalam penelitian ini. Pada studi parametrik variasi kuat tekan, rasio tulangan lentur, dan kuat tarik UPR-Mortar menunjukkan bahwa semakin besar nilai dari parameter-parameter tersebut, kuat geser balok akan semakin meningkat, sedangkan studi parametrik rasio bentang geser terhadap tinggi efektif menunjukkan bahwa semakin besar rasio a/d mampu menurunkan kapasitas geser balok beton bertulang.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada segenap rekan tim *Structural Research* 2021, orang tua, dan semua pihak yang senantiasa mendoakan dan memberi semangat bagi penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Penelitian ini didanai oleh Universitas Sebelas Maret melalui skema Penelitian Hibah Grup Riset (Penelitian HGR-UNS) dengan Nomor Kontrak: 452/UN27.21/PN/2020.

REFERENSI

- Červenka, V., & Červenka, J., 2017, "ATENA Program Documentation Part 2-2 User's manual for ATENA 3D".
- Cervenka, V., Jendele, L., & Cervenka, J., 2016, "ATENA Program Documentation Part 1 Theory". Atena, 1–282.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2007, "Standard Specifications For Concrete Structures – 2007: Materials and Construction In Concrete"
- Kristiawan, S. A., Saifullah, H. A., & Supriyadi, A., 2021 "Influence of Patching on the Shear Failure of Reinforced Concrete Beam without Stirrup", *Infrastructure* Vol. 6 no. 97
- Stefanus, K., Agus, S., Senot, S., & Hapsara, B. W. , 2017, "Shear Failure Of Patched Reinforced Concrete Beam Without Web Reinforcements" *Key Engineering Materials*, Vol. 737, pp.441–447. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.737.441>.
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G., 2012, "Reinforced Concrete Mechanics and Design (I. Pearson Education & Upper Saddle River (eds.); 6th ed.)", Prentice Hall. New Jersey.