

Kajian Parametrik Balok Beton Memadat Mandiri Menggunakan Analisis Nonlinier Elemen Hingga

*Mahmud Kori Effendi, Novi Rahmayanti, Iman Fathurahman

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

^{*}kori.effendi@uii.ac.id

Received: 7 Februari 2021 Revised: 22 November 2021 Accepted: 24 November 2021

Abstract

Self-compacting concrete has self-flowing, viscous and compact properties that minimize mechanical compaction. This concrete is suitable for solving the concrete pouring in the narrow and congested reinforcement. Beams made of both self-compacting concrete and normal high-strength concrete are analyzed by MSC Marc / Mentat software. Steel is modeled by being embedded in concrete. The failure criterion of Linear Mohr-Coulomb is used for concrete and Von Mises for reinforcing steel, respectively. Concrete and the plate support are modelled by 3D solid elements. For the steel, the truss element is used. The contact analysis is implemented between beam and both steel plate and steel supports. The load-deflection curve for both concrete are almost the same as the results of the experimental curve. The results of the contact analysis also showed that there were contact and separation in the contact area. The shear retention factor value close to one meaning will restrain greater loads. The results of the study on the reinforcement ratio also showed a reduction of 70% and an increase of 70% when using minimum and maximum reinforcement, respectively. The larger concrete cover also reduces the load that the beams can restrain.

Keywords: *Self-compacting concrete, finite element, embedded, MSC Marc/Mentat*

Abstrak

Beton memadat sendiri mempunyai sifat dapat mengalir sendiri, kental dan kompak sehingga meminimalkan pemadatan secara mekanis. Beton ini sangat cocok untuk mengatasi penempatan beton pada daerah yang sempit dan banyak tulangnya. Analisis nonlinier elemen hingga tiga dimensi balok beton memadat sendiri mutu tinggi dan normal beton mutu tinggi dengan pemadatan mekanis dilakukan dengan software MSC Marc/Mentat. Baja dimodelkan dengan tertanam di beton. Kriteria kegagalan Linier Mohr-Coulomb digunakan untuk beton dan Von Mises untuk baja tulangan. Beton dan tumpuan baja dimodelkan dengan elemen solid berbentuk kubus sisinya 25 mm. Baja tulangan diidealisasikan sebagai elemen truss. Kontak analisis dilakukan antara balok dengan pelat beban dan juga pelat tumpuan. Hasil kurva beban lendutan untuk kedua beton hampir sama dengan hasil kurva eksperimen. Hasil analisis kontak juga memperlihatkan terjadi kontak dan perlepasan pada bidang kontak baja tumpuan beban dan tumpuan balok dengan beton. Hasil parameter studi berupa faktor retensi geser memperlihatkan bahwa nilai faktor ini mendekati 1 maka balok akan lebih besar menahan beban, hal ini dikarenakan terjadi penguncian tegangan pada balok. Hasil studi mengenai rasio tulangan juga menunjukkan pengurangan 70% dan penambahan 70% apabila menggunakan tulangan minimum dan maksimum, berturut-turut. Selimut beton yang semakin besar juga mengurangi beban yang dapat ditahan oleh balok.

Kata kunci: *Beton memadat sendiri, elemen hingga, embedded, MSC Marc/Mentat*

Pendahuluan

Beton memadat mandiri/*self compacting concrete* (SCC) merupakan salah satu dari inovasi dari teknologi beton. Beton ini mempunyai sifat dapat mengalir sendiri, kental dan kompak sehingga

meminimalkan pemadatan secara mekanis (Amalia & Riyadi, 2019; Cattaneo & Mola, 2012; Gencel *et al.*, 2011; Katzer & Domski, 2012)]. Beton ini sangat cocok untuk mengatasi penempatan beton pada daerah yang sempit dan banyak tulangnya. Kesalahan manusia ketika memadatkan

menggunakan vibrotor mekanis menjadi minimum dan kualitas proyek sipil yang diharapkan menjadi kenyataan (Vidivelli & Gobi, 2013). Suatu campuran beton dapat dikatakan SCC dalam keadaan segar (*fresh concrete*) memenuhi syarat-syarat *flowability*, yaitu berupa kemampuan untuk dapat mengisi ruangan (*filling ability*), dapat melewati tulangan (*passing ability*) dan tahan terhadap pengaruh pemisahan butiran agregat (*segregation resistance*) (Joshy & Faisal, 2017; Katzer & Domski, 2012).

Balok merupakan salah satu elemen struktur yang penting dalam bangunan. Perilaku balok yang terbuat dari beton memadat mandiri mutu tinggi dan beton normal mutu tinggi perlu dilakukan. Beton mutu tinggi berbeda dengan beton memadat mandiri dalam hal komposisi material pembentuknya (Aslani & Nejadi, 2012). Beton mutu tinggi mempunyai kelebihan yaitu kekuatan awal yang tinggi, durabilitasnya tinggi dan juga permeabilitasnya rendah (Neupane *et al.*, 2018).

Oleh karena penelitian di laboratorium memerlukan biaya yang mahal, maka pendekatan analisis elemen hingga merupakan alternatif yang dapat menggantikan penelitian laboratorium. Penelitian perbandingan eksperimen dengan perangkat lunak ABAQUS pada balok lentur beton memadat mandiri dengan dan tanpa serat ban bekas dihasilkan hasil kurva beban-lendutan yang hampir sama (Hasan & Ali, 2020). Perangkat lunak ATENA digunakan untuk memvalidasi pengujian balok lentur SCC dengan material beton SCC mutu tinggi yang diperkuat dengan serat baja. Di dalam analisis, nodal tulangan baja menyatu dengan nodal beton (Sucharda *et al.*, 2017). Perangkat lunak ANSYS juga digunakan untuk membandingkan eksperimen balok lentur SCC. Beton dan tulangan baja dimodelkan menyatu (*perfectly bonded*). (Manju *et al.*, 2021).

Permasalahan dalam penelitian sebelumnya tulangan baja dan beton dimodelkan dengan *discrete model*. Pelat tumpuan dan pelat beban juga umumnya tidak dimodelkan seperti dalam eksperimen. Pada penelitian ini akan dikaji perilaku struktural balok beton memadat mandiri dan balok

beton mutu tinggi secara numerik menggunakan perangkat lunak MSC Marc/Mentat dengan model tulangan baja tertanam dalam beton/*embedded model*. Analisis dilakukan untuk kedua beton tersebut karena model elemen hingga perlu untuk diverifikasi terhadap kedua beton tersebut. Pemilihan perangkat lunak MSC Marc/Mentat dikarenakan dapat memodelkan kontak antara beberapa material (Polini & Corrado, 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi pemodelan tulangan tertanam di dalam beton/*embedded model* pada balok lentur memadat sendiri. Validasi model elemen hingga tersebut belum banyak dilakukan oleh para peneliti. Kalibrasi model analisis elemen hingga dengan software MSC Marc/Mentat tersebut dilakukan dengan hasil eksperimen yang diperoleh oleh Harkouss (Harkouss & Hamad, 2015). Dengan model elemen hingga yang sudah tervalidasi maka model digunakan untuk melakukan kajian parametrik berupa pengaruh *shear retention factor*, pengaruh rasio tulangan, dan pengaruh selimut beton pada perilaku lentur balok beton memadat mandiri.

Tabel 1. Notasi balok uji ()

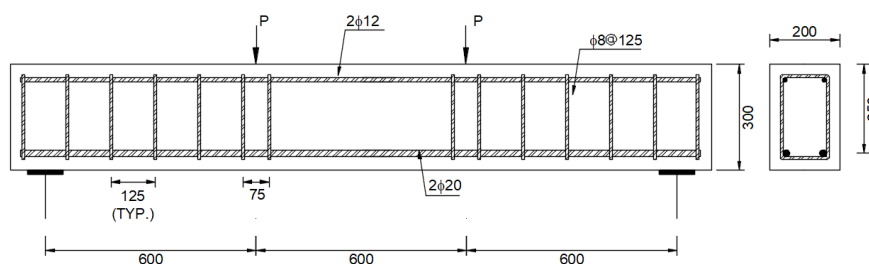
Notasi Balok	Adukan beton
SCC-F-B1	Beton memadat mandiri
SCC-F-B2	Beton memadat mandiri
VC-F-B1	Beton mutu tinggi
VC-F-B2	Beton mutu tinggi

Sumber: Harkouss & Hamad, 2015

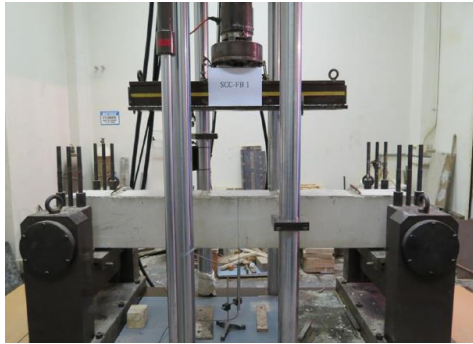
Metode

Eksperimen balok beton memadat mandiri dan balok beton mutu tinggi

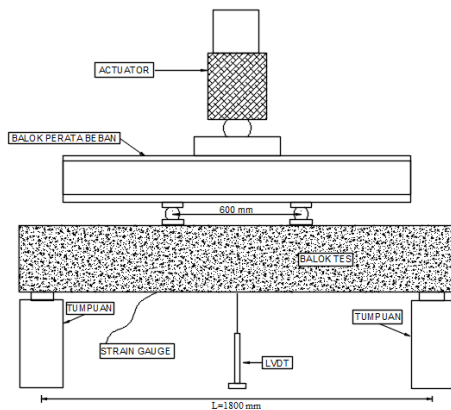
Sebagai data validasi analisis elemen hingga maka data eksperimen balok beton bertulang diambil dari penelitian oleh Harkouss (Harkouss & Hamad, 2015). Dimensi balok dapat dilihat pada Gambar 1, dimana balok berbentuk persegi panjang dengan lebar 200 mm dan tinggi 300 mm. Panjang bersih balok sebesar 1.800 mm dengan tumpuan sendi-rol. Pengujian balok di laboratorium dapat dilihat pada Gambar 2 dengan pembebanan dua titik.



Gambar 1. Sketsa balok eksperimen (satuan dalam mm)



Gambar 2. Pengujian balok eksperimen



Gambar 3. Pengaturan balok uji eksperimen

Gambar 3 menunjukkan posisi LVDT, posisi pembebanan dan tumpuan. Balok benda uji berupa balok beton memadat mandiri (SCC) dan balok beton mutu tinggi pemadatan mekanis dengan vibrator (VC) masing-masing dua buah, dengan notasi benda uji dapat dilihat pada Tabel 1. Sifat mekanik bahan benda uji dapat dilihat pada Tabel 2.

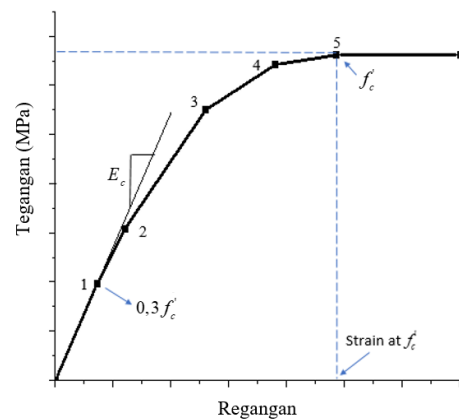
Model beton dan baja tulangan

Beton pada kondisi tekan dimodelkan secara multilinier. Tegangan diasumsikan linier sampai $0,3f'_c$ dan kemudian dibuat banyak garis dengan koordinat x adalah regangan dan koordinat y adalah tegangan tekan. Setelah mencapai koordinat y sebesar f'_c maka tegangan akan konstan seperti pada Gambar 4 (Kachlakev *et al.*, 2001). Model ini juga digunakan untuk analisis beton mutu tinggi (Effendi, 2020). Nilai $f'_c = 62,4$ MPa dan $f'_c = 57,9$ MPa untuk beton memadat mandiri dan beton mutu tinggi pemadatan mekanis, berturut-turut (Harkouss & Hamad, 2015). Nilai rasio Poisson adalah 0,3. Kriteria luluh menggunakan kriteria kegagalan Linear Mohr-Coulomb beserta aturan *kinematic hardening*. Material beton bersifat isotropik dengan faktor retensi geser/*shear retention factor* diambil 0,03 dan 0,07 untuk beton memadat mandiri dan beton mutu tinggi pemadatan mekanis, berturut-turut.

Tabel 2. Sifat mekanik beton dan baja

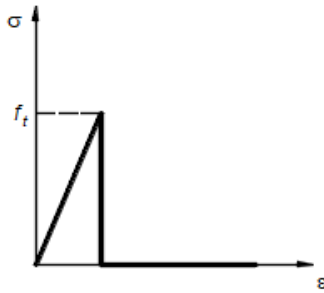
Bahan	Properti bahan	
Beton	Memadat mandiri	
	E	35.133 MPa
	ν	0,3
	f_t	4,3 MPa
Tulangan baja	Lentur bawah $2\phi 20$	
	E_s	200.000 MPa
	ν	0,3
	f_y	632 MPa
	f_u	743 MPa
Tulangan baja	Lentur atas $2\phi 12$	
	E_s	290.000 MPa
	ν	0,3
	f_u	667 MPa
Pelat tumpuan	Geser $2\phi 8$	
	E_s	220.000 MPa
	ν	0,3
	f_u	661 MPa
Pelat tumpuan	E_s	199.948 MPa
	ν	0,3

Sumber: Harkouss & Hamad, 2015

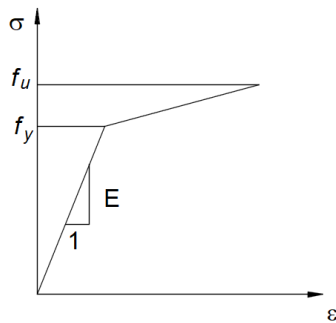


Gambar 4. Kurva regangan-tegangan untuk beton dalam kondisi tekan (Kachlakev *et al.*, 2001).

Untuk memodelkan tegangan-regangan beton di daerah tarik maka digunakan model material *elastic-brittle*, seperti ditunjukkan pada Gambar 5, dimana tegangan linier hingga mencapai tegangan tarik beton. Kekuatan beton turun menjadi nol setelah tegangan tarik tercapai. Tulangan baja dimodelkan secara bilinear. Linier awal adalah tegangan linier hingga tegangan leleh (f_y) dan selanjutnya linier hingga tegangan tarik ultimit (f_u) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Kriteria leleh digunakan kegagalan Von Mises dengan aturan pengerasan/*hardening rule* isotropik.



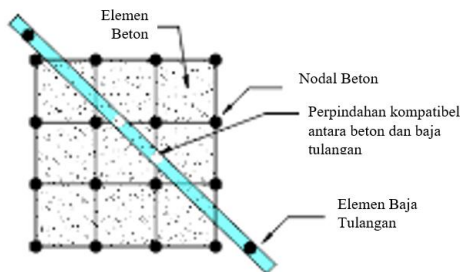
Gambar 5. Model beton kondisi tarik getas (Matsumoto & Mihashi, 2002)



Gambar 6. Model baja tulangan

Pemodelan interaksi baja tulangan dan beton

Ada tiga teknik dalam elemen hingga untuk pemodelan interaksi tulangan baja dan beton; model diskrit/*discrete model*, model tertanam/*embedded model*, dan model terolesi/*smeared model* (Tavárez, 2001). Model tertanam digunakan pada penelitian ini dikarenakan, model tertanam (Gambar 7) tidak menggunakan nodal berbagi antara beton dan tulangan baja. Kekakuan setiap bahan dievaluasi secara terpisah. Kompatibilitas perpindahan beton dan baja pada node yang berbeda.



Gambar 7. Teknik pemodelan tertanam / *embedded* tulangan baja dalam beton (Tavárez, 2001).

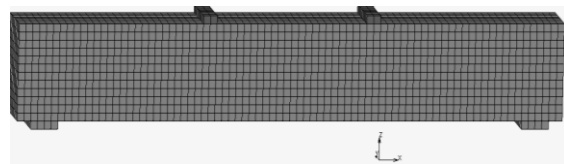
Hasil dan Pembahasan

Verifikasi dengan analisis elemen hingga

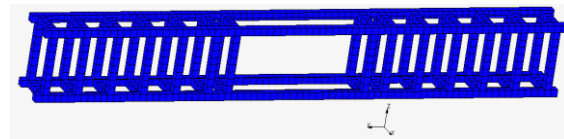
Elemen tipe 7 (MSC, 2010) yang digunakan untuk memodelkan beton adalah 3D solid. Elemen ini mempunyai delapan nodal dan berbentuk

heksahedral. Untuk pelat tumpuan juga digunakan elemen tipe 7. Tulangan baja dimodelkan menggunakan elemen tipe 9 (MSC, 2010). Elemen ini berupa elemen truss dua nodal.

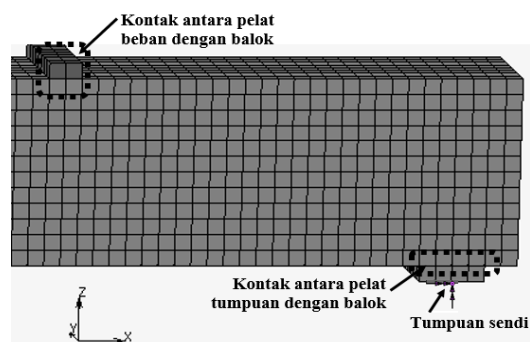
Meshing beton terlihat pada Gambar 8. Bentuk elemen berupa kubus dengan sisi 25 mm. Pemodelan dilakukan dengan skala penuh. Untuk tumpuan beban digunakan bentuk kubus yang sama sisi berukuran 25 mm. Panjang tumpuan 100 mm, lebar 200 mm, dan tinggi 25 mm. Nodal antara pelat tumpuan dengan nodal beton dibuat terpisah dan tidak berbagi titik nodal. Pelat beban dimodelkan dengan geometri berbentuk *surface*. Ukuran sama dengan ukuran tumpuan pelat. Dua beban berjarak 600 mm ditempatkan simetri terhadap tengah bentang balok untuk memodelkan lentur murni. Walaupun di dalam eksperimen beban berupa kontrol beban, akan tetapi dalam pemodelan elemen hingga ini digunakan beban berupa kontrol *displacement*. Pergerakan vertikal kedua beban dibuat vertikal ke bawah 20 mm. Untuk *meshing* tulangan sengkang dan lentur dapat dilihat pada Gambar 9 dan dibuat sedemikian hingga nodal terdapat dalam elemen persegi balok beton sebagaimana dijelaskan dalam model tertanam/*embedded model*.



Gambar 8. Model beton skala penuh



Gambar 9. Model tulangan baja *embedded* pada beton



Gambar 10. Kondisi batas tumpuan dan pembebanan

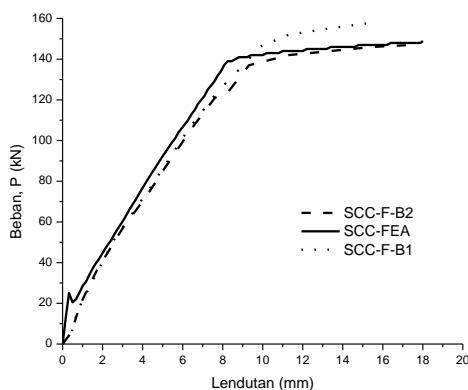
Kontak analisis berupa *touching* dalam MSC Marc/Mentat dilakukan dengan mengatur

permukaan elemen balok bersentuhan dengan permukaan geometri *surface* pelat beban. Kontak analisis berupa *touching* juga terjadi antara balok beton dengan pelat tumpuan. Tumpuan balok dimodelkan berupa tumpuan sendi-rol. Pemodelan sendi dan rol dilakukan dengan cara pada bagian tengah nodal pelat tumpuan diatur menahan pergerakan ke arah *x*, *y* dan *z* dan juga menahan rotasi *x* dan *z* tetapi bebas terhadap rotasi arah *y*. Ilustrasi kondisi beban dan kondisi batas ditunjukkan pada Gambar 10.

Respon beban-lendutan

Kurva beban lendutan balok beton bertulang umumnya berupa trilinear (Campione, 2008; Frans & Tahya, 2020; Manju *et al.*, 2021), dimana bagian pertama linier/elastis sebelum retak, bagian kedua setelah retak sampai baja mulai leleh, bagian akhir baja mulai leleh sampai beton mencapai *fracture*/patah. Bentuk trilinear ini terlihat pada Gambar 11 dan 12. Untuk beban maksimum pada hasil analisis elemen hingga dihitung pada saat pergerakan beban vertikal bergerak ke bawah sebesar 20 mm.

Perbandingan respon beban-lendutan antara balok beton memadat mandiri eksperimen dengan balok hasil elemen hingga dapat dilihat pada Gambar 11. Kurva beban-lendutan balok beton memadat mandiri hasil elemen hingga, SCC-FEA, tidak sama persis dengan kurva beban-lendutan balok eksperimen, SCC-F-B1 dan SCC-F-B2. Respon kedua balok eksperimen tersebut juga tidak menghasilkan hasil yang sama persis.

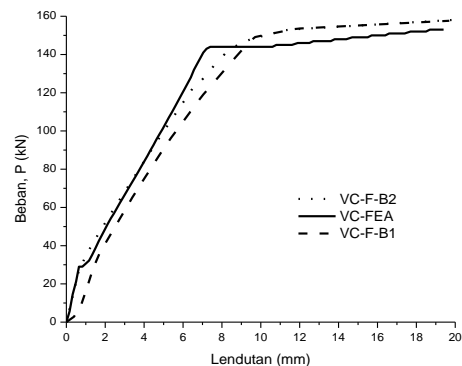


Gambar 11. Kurva beban-lendutan balok memadat mandiri

Hal ini terjadi karena beton itu bersifat material heterogen sehingga kemungkinan balok SCC-F-B1 mempunyai kekuatan tekan beton lebih tinggi daripada balok SCC-F-B2. Beban maksimum balok SCC-FEA hampir sama dengan balok eksperimen balok SCC-F-B2 yaitu sebesar 149 kN. Untuk balok eksperimen SCC-F-B1 menghasilkan beban

maksimum sebesar 158 kN. Perbedaan beban maksimum sebesar 3,3%. Dapat disimpulkan bahwa hasil yang diperoleh secara analisis elemen hingga sesuai dengan hasil yang diperoleh secara eksperimental.

Gambar 12 menunjukkan perbandingan respon beban-lendutan antara balok beton mutu tinggi dengan balok hasil elemen hingga. Kurva beban-lendutan balok mutu tinggi hasil elemen hingga, VC-FEA, tidak sama persis dengan kurva beban-lendutan balok eksperimen, VC-F-B1 dan VC-F-B2. Kedua balok eksperimen tersebut menghasilkan kurva yang sama pada beban setelah 149 kN. Beban maksimum balok SCC-FEA sebesar 158 kN, sedangkan balok SCC-F-B2 dan balok VC-B2 mempunyai beban maksimum sebesar 153 kN. Perbedaan beban maksimum sebesar 3,3%. Dapat disimpulkan bahwa hasil yang diperoleh secara analisis elemen hingga sesuai dengan hasil yang diperoleh secara eksperimental.

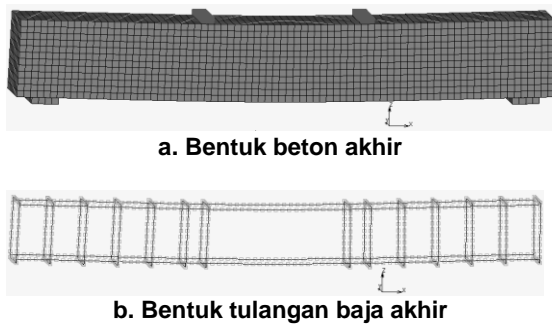


Gambar 12. Kurva beban-lendutan balok mutu tinggi

Bentuk balok akhir analisis

Bentuk akhir balok beton memadat mandiri dan balok beton mutu tinggi hampir sama. Gambar 13(a) menunjukkan bentuk balok beton memadat mandiri yang telah terdeformasi. Gambar 13(b) menunjukkan bentuk akhir tulangan lentur dan tulangan sengkang. Model tulangan tertanam dalam beton terlihat berhasil dalam analisis balok beton memadat mandiri dan balok mutu tinggi. Pembebanan dua buah menghasilkan balok melentur ke bawah. Untuk bentuk akhir balok beton dengan pelat beban dapat dilihat pada Gambar 14. Akibat balok melentur terjadi pelat beban terpisah dengan balok beton sehingga terlihat celah. Terlihat pada Gambar 14, bahwa terjadi pemisahan titik nodal antara nodal balok beton dengan nodal pelat beban. Kontak analisis berupa *touching* dalam MSC Marc/Mentat berhasil untuk memodelkan kontak antara pelat beban dengan balok. Hal ini berbeda dengan baja tumpuan balok seperti pada Gambar 15, tidak terlihat celah pada elemen balok dengan

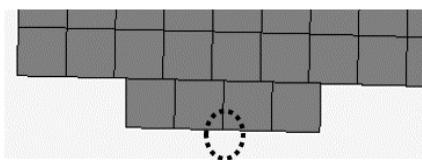
elemen pelat tumpuan. Hal ini terjadi karena pengkekangan hanya pada nodal yang diberi tanda lingkaran maka tumpuan masih bisa berotasi atau bergerak mengikuti pergerakan balok beton.



Gambar 13. Bentuk lentur balok



Gambar 14. Bentuk kontak pelat beban dan balok beton



Gambar 15. Bentuk kontak pelat tumpuan dan balok beton

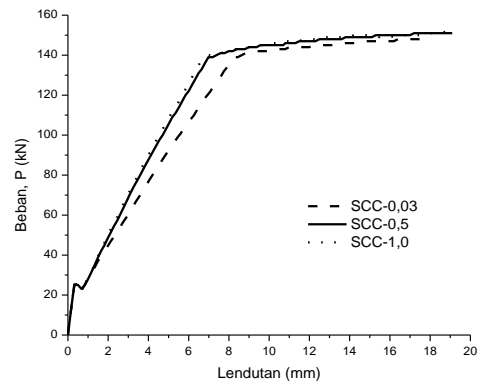
Pengaruh *shear retention factor*

Faktor retensi geser atau *shear retention factor* mengacu pada jumlah transfer geser melintasi retakan. Faktor retensi geser sebesar nol mengacu pada tidak ada *interlock* antar agregat, sedangkan satu mewakili *interlock* antar agregat penuh. Jika nilai faktor retensi geser ditentukan mendekati 1, ada kemungkinan terjadi penguncian tegangan/*stress locking* (Mitra & Lowes, 2008).

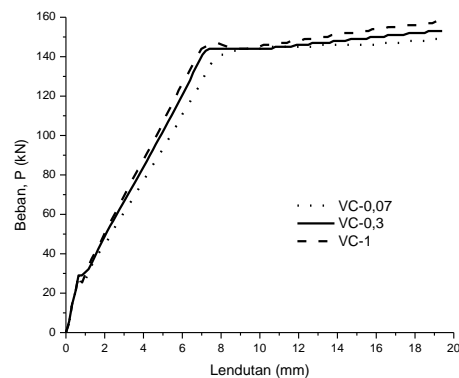
Pada Gambar 16 terlihat bahwa *shear retention factor* tidak berpengaruh pada kondisi sebelum retak balok memadat sendiri. Faktor ini berpengaruh setelah terjadi retak, semakin nilai *shear retention factor* mendekati satu maka beban yang dapat ditahan semakin besar. Nilai ini apabila kurang dari 0,03 maka terjadi *error* pada *running software*.

Pengaruh *shear retention factor* terhadap perilaku lentur balok mutu tinggi dengan pematatan mekanis sama dengan perilaku balok memadat

mandiri seperti pada Gambar 17. Nilai faktor ini paling kecil sebesar 0,07. Apabila nilai ini kurang dari nilai tersebut maka terjadi *error* pada *running software*.



Gambar 16. Pengaruh *shear retention factor* pada balok memadat sendiri



Gambar 17. Pengaruh *shear retention factor* pada balok mutu tinggi

Pengaruh rasio tulangan

Tulangan minimum menurut SNI

$$A_{s\min 1} = \frac{1,4}{f_y} bd \text{ dan } A_{s\min 2} = \frac{0,25\sqrt{f'_c}}{f_y} bd$$

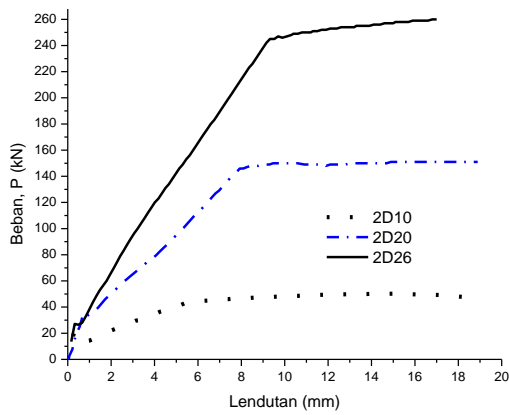
Dan tulangan maksimum

$$A_{s\max} = 0,75 \cdot \beta_1 \cdot \frac{600}{(600 + f_y)} \cdot 0,85 \frac{f'_c}{f_y} bd$$

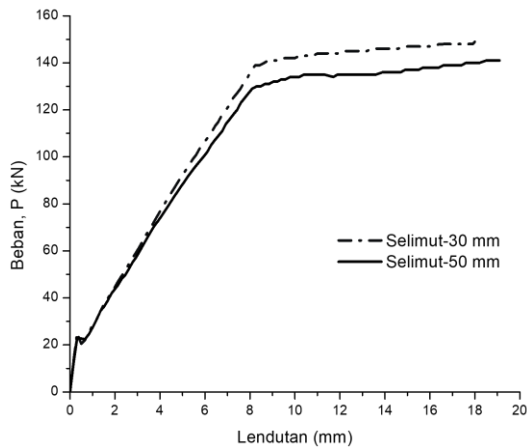
Dari perhitungan didapatkan $A_{s\min 2}$ sebesar 158 mm^2 , dan digunakan untuk tulangan minimum sebesar 2D10. Untuk tulangan maksimum didapatkan sebesar 1.099 mm^2 , dan digunakan tulangan maksimum 2D26. Pada Gambar 18 terlihat bahwa tulangan minimum menghasilkan beban yang paling kecil, sebesar 47 kN dan tulangan maksimum menghasilkan beban yang paling besar, sebesar 260 kN. Beban maksimum yang ditahan oleh tulangan 2D20 sebesar 149 kN, apabila dibandingkan dengan tulangan minimum maka lebih besar 70% dan apabila dibandingkan tulangan maksimum lebih kecil 70%.

Pengaruh selimut beton

Selimut beton minimum menurut SNI 2847:2019 (Nasional, 2019) yaitu beton yang terekspos tanah atau cuaca dengan batang tulangan No. 19 dan yang lebih besar sebesar 50 mm. Untuk beton yang tidak terekspos tanah atau cuaca sebesar 20 mm. Pada Gambar 19 terlihat bahwa pada daerah elastik tidak terpengaruh pada selimut beton, akan tetapi setelah terjadi retak maka selimut beton yang besar beban menjadi lebih rendah. Selimut beton semakin besar maka beban maksimum yang dapat ditahan menjadi semakin berkurang. Beban maksimum selimut beton 30 mm sebesar 149 kN sedangkan untuk selimut beton 50 mm sebesar 141 kN.



Gambar 18. Pengaruh rasio tulangan



Gambar 19. Pengaruh selimut beton

Kesimpulan

Validasi model elemen hingga dengan menggunakan pemodelan tulangan tertanam di dalam beton pada balok lentur memadat sendiri dan balok lentur beton mutu tinggi dilakukan dengan melalui analisis numerik dengan menggunakan metode elemen hingga. Perangkat lunak MSC Marc/Mentat digunakan sebagai alat untuk melakukan perhitungan dan pembuatan model

elemen hingga. Data eksperimen diambil dari penelitian yang dilakukan oleh Harkous. Pemberian beban menggunakan pendekatan kontrol lendutan. Pada pemodelan beton digunakan elemen 3D solid dan elemen truss digunakan untuk tulangan baja. Untuk memodelkan interaksi antara tulangan baja dan beton maka digunakan model tulangan tertanam di dalam beton. Model elemen hingga dengan tulangan tertanam relatif mudah digunakan dalam pemodelan interaksi beton dan tulangan baja. Hal ini dikarenakan nodal beton dan nodal tulangan baja tidak sama atau berbagi titik nodal. Titik nodal antara beton dan baja terpisah.

Model elemen hingga balok beton memadat mandiri dan balok beton mutu tinggi menghasilkan hasil tren kurva beban-lendutan yang relatif sama dengan balok eksperimen. Faktor retensi geser atau shear retention factor mengacu pada jumlah transfer geser melintasi retakan. Faktor retensi geser sebesar 0 mengacu pada tidak ada *interlock* antar agregat, sedangkan 1 mewakili *interlock* antar agregat penuh. Jika nilai faktor retensi geser ditentukan mendekati 1, ada kemungkinan terjadi penguncian tegangan. Analisis elemen hingga dengan faktor retensi geser diambil 0,03 dan 0,09 untuk beton memadat mandiri dan beton mutu tinggi pemadatan mekanis, masing-masing menghasilkan hasil dengan tren kurva beban-lendutan yang sama dengan hasil eksperimen. Untuk mendapatkan hasil yang sama persis sangat sulit, hal ini dikarenakan dalam eksperimen saja (balok SCC-F-B1 dan SCC-F-B2 atau VSS—B1 dan VCC-F-B2)) dihasilkan hasil yang berbeda walaupun menggunakan material dan setting pengujian yang sama. Semakin tinggi nilai faktor retensi geser maka kurva beban-lendutan yang dihasilkan semakin besar bebannya.

Analisis kontak digunakan untuk memodelkan kondisi balok seperti pada saat eksperimen. Pelat baja tumpuan dan pelat baja pembebanan pada eksperimen dimodelkan juga dalam model elemen hingga. Pada analisis dengan metode elemen hingga dihasilkan terjadi perpindahan nodal antara elemen beton dan nodal elemen baja. Fenomena ini sama dengan yang terjadi di eksperimen.

Hasil studi mengenai rasio tulangan juga menunjukkan pengurangan 70% dan penambahan 70% apabila menggunakan tulangan minimum dan maksimum, berturut-turut. Selimut beton yang semakin besar juga mengurangi beban yang dapat ditahan oleh balok.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Daftar Pustaka

- Amalia, A., & Riyadi, M. (2019). Kualitas beton SCC dengan substitusi agregat halus tailing tambang emas daerah pongkor. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(1), 59–68.
- Aslani, F., & Nejadi, S. (2012). Mechanical properties of conventional and self-compacting concrete: An analytical study. *Construction and Building Materials*, 36, 330–347.
- Campione, G. (2008). Simplified flexural response of steel fiber-reinforced concrete beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(4), 283–293.
- Cattaneo, S., & Mola, F. (2012). Assessing the quality control of self-consolidating concrete properties. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(2), 197–205.
- Effendi, M. K. (2020). Non-linear finite element analysis of flexural reinforced concrete beam using embedded reinforcement modeling. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 6(3), 271–284.
- Frans, P. L., & Tahya, H. (2020, October). Behavior Of Concrete Beam Deflection Framework System. In *Proceeding on International Conference of Science Management Art Research Technology 1(1)*, 151-159.
- Gencil, O., Brostow, W., Datashvili, T., & Thedford, M. (2011). Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Composite Interfaces*, 18(2), 169–184.
- Harkouss, R. H., & Hamad, B. S. (2015). Performance of high strength self-compacting concrete beams under different modes of failure. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(1), 69–88.
- Hasan, T. M., & Ali, A. S. (2020). Flexural behavior of fiber reinforced self-compacting rubberized concrete beams. *Journal of Engineering*, 26(2), 111–128.
- Joshy, V., & Faisal, K. M. (2017). Experimental study on the behaviour of spirally reinforced SCC beams. *Int J Eng Res General Sci*, 5(3), 96–105.
- Kachlakev, D. I., Miller, T. H., Potisuk, T., Yim, S. C., & Chansawat, K. (2001). *Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates*. Oregon. Dept. of Transportation. Research Group.
- Katzer, J., & Domski, J. (2012). Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete. *Construction and Building Materials*, 34, 243–248.
- Manju, R., Barkavi, J. A., & Swathy, J. H. J. S. (2021). Experimental and analytical investigations of flexural behaviour of self-compacting concrete rectangular beams. In *Advances in Construction Materials and Structures* (pp. 101–114). Springer.
- Matsumoto, T., & Mihashi, H. (2002). JCI-DFRCC summary report on DFRCC terminologies and application concepts. *Proceedings of JCI International Workshop on Ductile Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 59–66.
- Mitra, N., & Lowes, L. N. (2008). Factors influencing analytical continuum simulation of three-point bend test of a concrete notched beam. *De The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing-China*.
- MSC. (2010). Volume B: Element Library. *MSC. Software Corporation*, 113–661.
- Nasional, B. S. (2019). Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan, SNI 2847: 2019. Jakarta, Indonesia: BSN.
- Neupane, K., Chalmers, D., & Kidd, P. (2018). High-strength geopolymer concrete—properties, advantages and challenges. *Advances in Materials*, 7(2), 15–25.
- Polini, W., & Corrado, A. (2019). Uncertainty in manufacturing of lightweight products in composite laminate: part 1—numerical approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5), 1423–1434.
- Sucharda, O., Pajak, M., Ponikiewski, T., & Konecny, P. (2017). Identification of mechanical and fracture properties of self-compacting concrete beams with different types of steel fibres using inverse analysis. *Construction and Building Materials*, 138, 263–275.
- Tavárez, F. A. (2001). *Simulation of behavior of composite grid reinforced concrete beams using explicit finite element methods*. Madison: University of Wisconsin.
- Vidivelli, B., & Gobi, T. K. T. (2013). Flexural behaviour of self compacting and self curing concretebeams. *International Journal of Engineering Mathematics and Computer Sciences*, 1(2).