

KAJIAN PERILAKU *RUPTURE* MELALUI SIMULASI NUMERIK

Bobby Rio Indriyantho, Aditya Sage Pamungkas
Han Ay Lie, Sukamta

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH., Tembalang, Semarang 50239,
Telp.: (024) 7474770, Fax.: (024) 7460060

ABSTRACT

Concrete is very common material used in reinforced concrete structure. There are several behaviors that influence its performance to the structure since its nonlinear behavior (Nawy, 1998). Nonlinear concrete behavior, besides can be obtained by experimental test result in laboratory, also can be conducted with one of the numerical simulation approach, namely finite element method. Based on the case, it will be conducted numerical modeling of concrete material with input the nonlinearity and orthotropic of concrete.

Load-displacement response of concrete without reinforcement at small loading tends to linear then will be nonlinear when enters the cracking zone. Möhr and Kupfer failure criteria are used to evaluate the failure in concrete beam. Validation is a step conducted to view the validity from numerical study result that will be used as tools. Data resulted from experimental and numerical study is validated with research of Purkiss-Blagojevic (1993). This FEM program can be used as tools to analyze load-displacement response of concrete beam test specimen without reinforcement and predict the initial crack pattern happened.

Keywords: *Finite Element Method, orthotropic, nonlinear, Mohr and Kupfer failure criteria*

ABSTRAK

Beton merupakan material yang sangat umum digunakan dalam struktur beton bertulang. Ada beberapa perilaku yang mempengaruhi kinerjanya terhadap struktur akibat perilaku nonlinearisnya (Nawy, 1998). Perilaku beton nonlinear yang selain bisa didapatkan melalui hasil uji ekperimental di laboratorium, dapat juga dilakukan dengan salah satu pendekatan simulasi metode numerik yaitu metode elemen hingga (finite element method). Berdasarkan hal tersebut, maka akan dilakukan permodelan numerik material beton dengan memasukkan sifat nonlinear dan sifat ortotropik dari beton.

Respon load-displacement beton tanpa tulangan pada beban yang kecil cenderung linear kemudian menjadi nonlinear ketika memasuki daerah retak dan akhirnya mencapai kegagalan. Kriteria keruntuhan Möhr atau Kupfer digunakan untuk mengevaluasi kegagalan pada balok beton. Validasi merupakan langkah yang dilakukan untuk melihat kesahihan dari hasil studi numerik.. Data yang dihasilkan dari studi numerik divalidasi dengan hasil stusi eksperimental dan penelitian Purkiss-Blagojevic (1993). Program FEM ini dapat digunakan sebagai alat bantu untuk menganalisis respon load-displacement benda uji balok beton tanpa tulangan dan memprediksi pola keruntuhan awal yang terjadi.

Kata Kunci : *Finite Elemen Method, ortotropik, nonlinear, kriteria keruntuhan Möhr dan Kupfer*

PENDAHULUAN

Material beton merupakan bahan yang sangat umum digunakan dalam struktur beton bertulang. Anggapan material beton yang homogen dan isotropik masih dalam pengertian makroskopik. Kenyataannya beton merupakan material yang heterogen dengan keberagaman material penyusun beton tersebut. Terdapat beberapa perilaku yang mempengaruhi kinerjanya terhadap struktur akibat perilaku ketidaklinearnya (Nawy, 1998). Material beton akan mengalami perubahan sifat dari material isotropik menjadi material ortotropik setelah beton mencapai tegangan puncaknya.

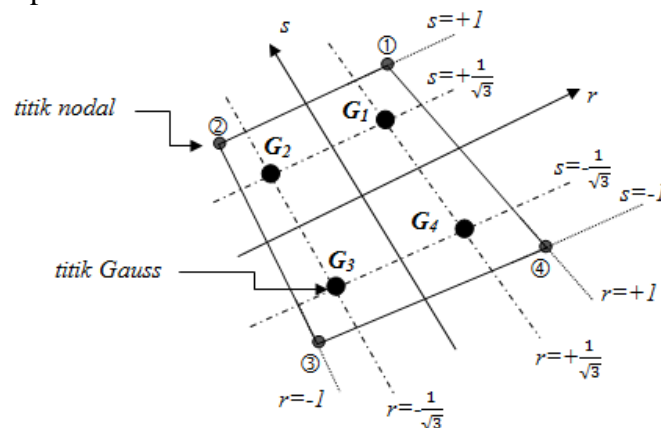
Analisis tegangan bidang material beton bisa didekati menggunakan tegangan uniaksial, biaksial, dan triaksial. Pendekatan analisis dengan tegangan uniaksial baik tarik maupun tekan lebih sering digunakan, tetapi pendekatan tersebut tidak sesuai dengan realita yang terjadi pada material beton. Kondisi yang lebih realistis terjadi pada material beton ialah tegangan triaksial. Analisis pada kondisi ini cukup sulit dalam analisis. Alternatif lain untuk mempermudah dalam perhitungan yaitu dengan menganggap material beton dalam kondisi tegangan biaksial.

Pemahaman tentang perilaku struktur beton pada umumnya diperoleh dari hasil uji eksperimental di laboratorium. Data yang menggambarkan perilaku beton secara detail dapat diperoleh dengan melakukan banyak pengujian dan berulang-ulang. Hal tersebut akan membutuhkan besarnya biaya dan waktu yang lama. Perilaku beton nonlinear yang selain bisa didapatkan melalui hasil uji eksperimental di laboratorium sendiri sebenarnya dapat dilakukan dengan salah satu pendekatan simulasi metode numerik yaitu dengan metode elemen hingga (*finite element method*). Perilaku nonlinear beton umumnya menjadi persoalan tersendiri dalam melakukan studi simulasi analisis numerik berbasis *finite element analysis*. Berdasarkan hal tersebut, maka akan dilakukan permodelan numerik material beton dengan memasukkan sifat nonlinearnya. Hasil keluaran (*output*) program tersebut akan divalidasi dengan hasil eksperimental dari benda uji 38 MPa yang dibuat di laboratorium dan penelitian Purkiss-Blagojevic (1993).

PERMODELAN BALOK BETON TANPA TULANGAN

Metode Elemen Hingga

Permodelan metode elemen hingga ini menggunakan elemen isoparametrik *quadrilateral* empat titik nodal seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Koordinat Gauss point (Cook, 1990)

Matriks material

Matriks material konstitutif diambil dari persamaan Chen dan Saleeb (1982) sebagai berikut:

$$[E_G] = [T]^T [E_P] [T] \quad (1)$$

dengan:

$$[E_P] = \begin{bmatrix} \lambda \frac{E_1}{E_2} & \lambda \nu & 0 \\ \lambda \nu & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (2) \quad \lambda = \frac{E_1}{\frac{E_1}{E_2} - \nu^2} \quad (3) \quad G = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2 + 2\nu \cdot E_2} \quad (4)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2 \sin \theta \cos \theta & 2 \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

dimana:

E_1 = Modulus elastisitas dalam arah regangan utama mayor (MPa)

E_2 = Modulus elastisitas dalam arah regangan utama minor (MPa)

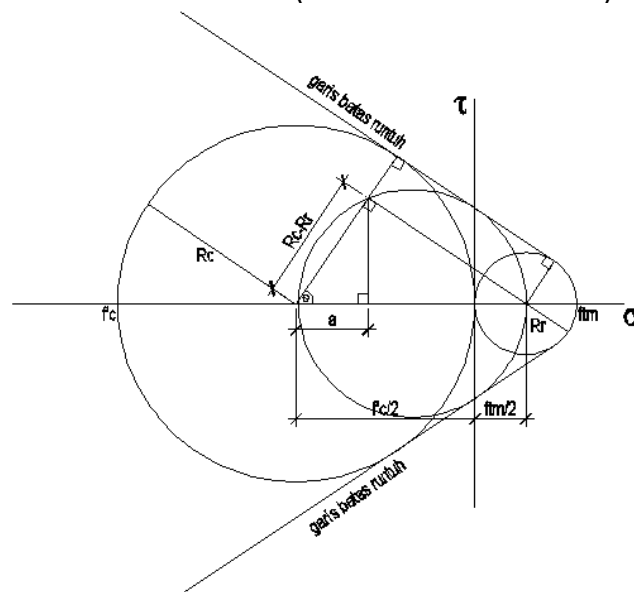
ν = Poisson's ratio

θ = Sudut perputaran dari sistem koordinat global ke sumbu utama

Kriteria keruntuhan Möhr dan Kupfer

Garis singgung yang menyinggung dua lingkaran Mohr untuk kondisi keruntuhan tekan uniaksial dan tarik uniaksial seperti pada Gambar 2 menggunakan persamaan 6.

$$\sigma^2(m^2 + 1) + \sigma(2mc - \sigma_x + \sigma_y) + \left(\frac{(\sigma_x + \sigma_y)^2}{4} + c^2 - R^2 \right) = 0 \quad (6)$$



Gambar 2. Persyaratan keruntuhan Möhr

Kupfer *et al.* (1969) memperkenalkan suatu model *failure envelope* dengan empat kuadran. (Gambar 3). Kuadran pertama menampilkan zona tarik untuk kasus dimana regangan utama ε_1 dan ε_2 adalah dalam kondisi tarik. Kegagalan zona tarik terjadi ketika tegangan

tarik utama melampaui kuat tarik f_{tm} material beton. Kuadran kedua dan keempat memperlihatkan zona tarik-tekan. Persamaan 7 mengekspresikan *Failure envelope* tekan-tarik yang didekati dengan hubungan linear. Kuadran ketiga menampilkan zona tekan. *Failure envelope* diekspresikan oleh suatu elips pada kuadran ketiga (Kupfer *et al.*, 1969) dan bergantung pada dua parameter a dan b yang mengkarakteristikkan jari-jari elips ini, sedangkan pusat elips diekspresikan sebagai c . (Persamaan 8)

$$\sigma_1 + \left[\frac{f_{tm}}{f_{cm}} \right] \sigma_2 = f_{tm} \quad (7)$$

$$\frac{\left(\frac{\sigma_1}{f_{cm}} + \frac{\sigma_2}{f_{cm}} - 2c \right)^2}{2a^2} + \frac{\left(\frac{\sigma_2}{f_{cm}} - \frac{\sigma_1}{f_{cm}} \right)^2}{2b^2} = 1 \quad (8)$$

dimana:

$$a = f_1(f_{cm})$$

$$b = f_2(f_{cm})$$

$$c = f_3(f_{cm})$$

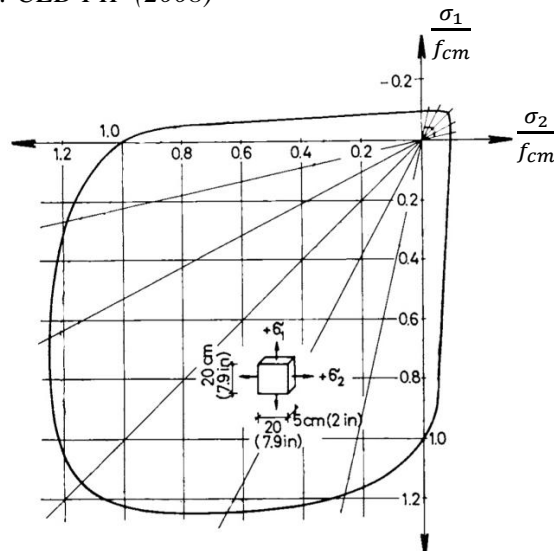
$$f_i(f_{cm}) = A_i(f_{cm})^2 + B_i f_{cm} + C_i \quad \text{dengan } i = 1, 2, 3$$

A_i, B_i, C_i berdasarkan Tabel 1

Tabel 1. Parameter Persamaan (8)

i	1	2	3
A_i	$1.1496 \cdot 10^{-4}$	$1.7305 \cdot 10^{-5}$	$-1.1685 \cdot 10^{-4}$
B_i	-0.0246	-0.00270	0.01830
C_i	1.9955	0.80962	-0.23946

Sumber : CEB-FIP (2008)

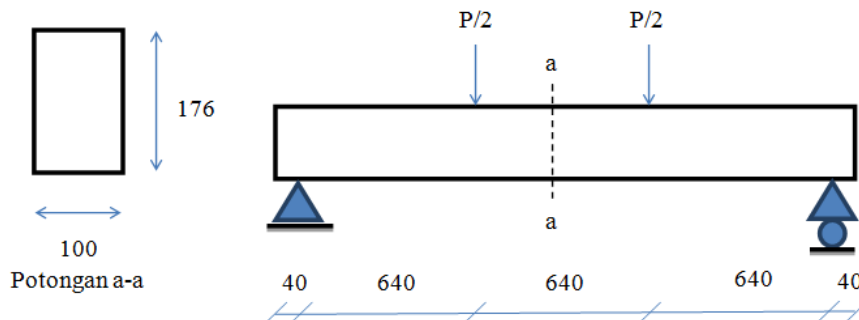


Gambar 3. Persyaratan keruntuhan Kupfer

DETAIL PENGUJIAN EKSPERIMEN

Detail Benda Uji

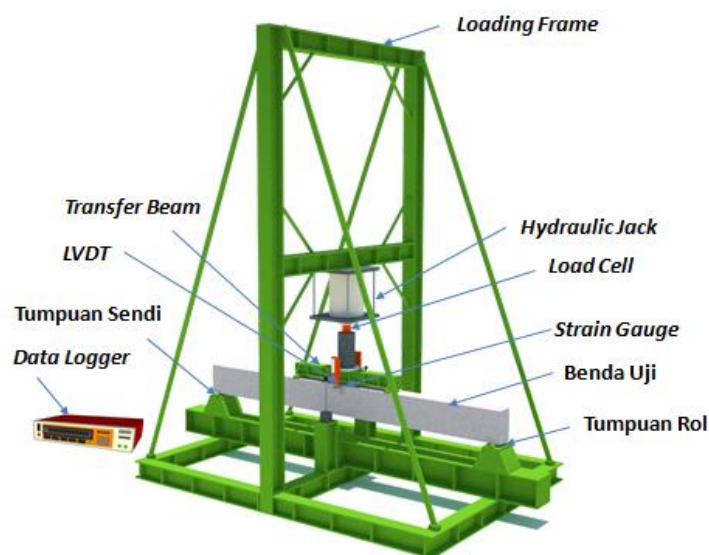
Benda uji yang dibuat menggunakan mutu beton rencana f'_c 30 MPa berupa silinder dan balok beton polos. Benda uji silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dengan jumlah 12 buah benda uji. Perinciannya adalah 6 buah silinder untuk uji perilaku tegangan-regangan, 3 buah silinder untuk uji belah, dan 3 buah silinder untuk modulus elastisitas. Dimensi dari benda uji balok beton mengacu pada Purkiss dan Blagojevic (1993). Balok beton yang digunakan dalam eksperimen ini diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Geometri specimen benda uji balok beton

Prosedur Pengujian

Pengujian benda uji balok dilakukan setelah beton berumur 28 hari. Alat-alat yang dipakai untuk menguji balok beton terdiri dari rangka baja (*loading frame*), *hydraulic jack* dan *hydraulic pump*, *load cell*, *data logger*, *LVDT* (*Linear Variable Differential Transducer*). Benda uji ditempatkan pada *loading frame* dengan tumpuan sendi dan rol pada kedua ujungnya. *Set-up* pengujian balok beton dapat dilihat pada Gambar 5. Data yang diperoleh dari pengujian meliputi lendutan selama pembebanan berlangsung, besarnya beban maksimum.



Gambar 5. *Set-up* pengujian balok beton

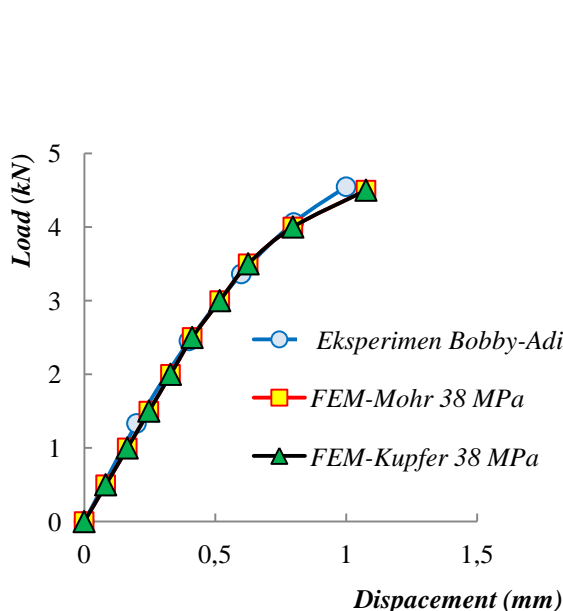
VALIDASI PROGRAM

Balok Beton f'_c 38 MPa (Beam 1 dan Beam 2)

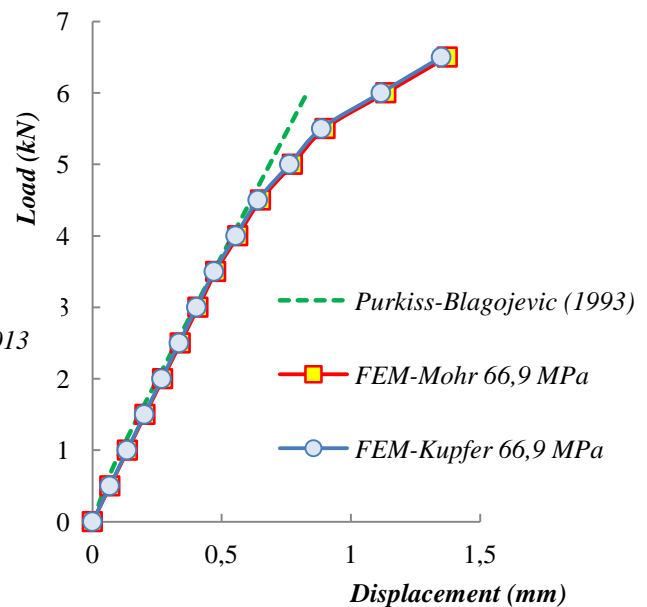
Gambar 6 menunjukkan perbandingan kurva beban-perpindahan antara rata-rata hasil uji laboratorium dan output program FEM. Kesimpulan dari hasil tersebut adalah kurva hasil program FEM mendekati kurva hasil uji laboratorium. Spesimen balok FEM runtuh ketika P_{maks} 4,5 kN dan *displacement* 1,076 mm dengan kriteria keruntuhan Möhr, sama dengan Kupfer juga tercapai beban puncak $P_{maks} = 4,5$ kN dan *displacement* 1,076 mm.

Balok Beton f'_c 66,9 MPa (Purkiss dan Blagojevic, 1993)

Hasil perbandingan dapat disimpulkan bahwa P_{maks} dan *displacement* program FEM lebih besar dibandingkan penelitian Purkiss dan Blagojevic (1993). Trend kurva program FEM mengikuti trend kurva penelitian tersebut, tetapi terlihat lebih nonlinear pada beban di atas 3 kN dan *displacement* di atas 0,5 mm. Penelitian Purkiss-Blagojevic merupakan beton mutu tinggi, sehingga hasilnya lebih getas daripada output program FEM.



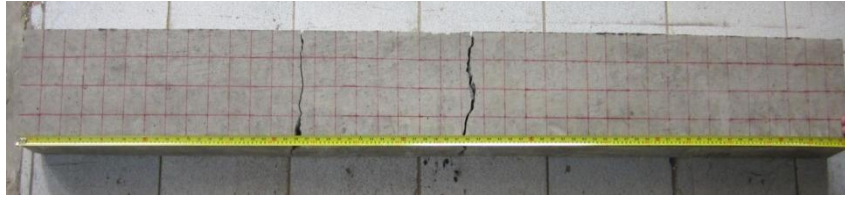
Gambar 6. Kurva hasil eksperimen dan program FEM



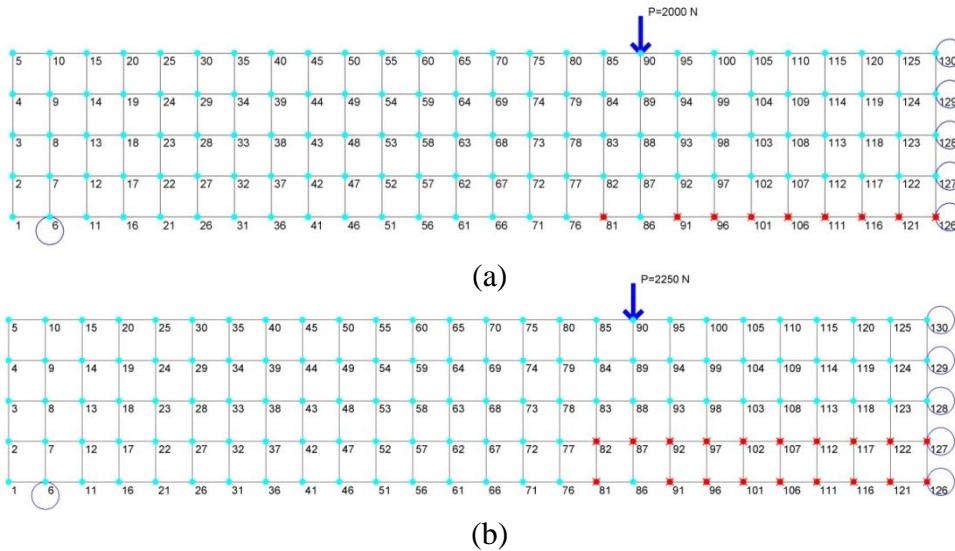
Gambar 7. Kurva hasil penelitian dan program FEM

Visualisasi Retak pada Balok Beton Beam 1 dan Beam 2

Pola retak pada hasil pengujian Beam 1 dan Beam 2 berlokasi pada daerah yang menderita momen terbesar yaitu $1/3$ L dari tumpuan (Gambar 8). *Output* yang diberikan pada program FEM mengevaluasi nodal-nodal yang mengalami keruntuhan (berwarna merah) akibat dari nonlinearitas material beton. Nodal-nodal yang mengalami keruntuhan sesuai dengan hasil pengujian yaitu pada daerah momen maksimum (Gambar 9). Retak nodal dan visualisasi pola retak menunjukkan bahwa keruntuhan yang terjadi sesuai dengan gaya dalam yang bekerja pada balok.



Gambar 8. Keruntuhan pada balok

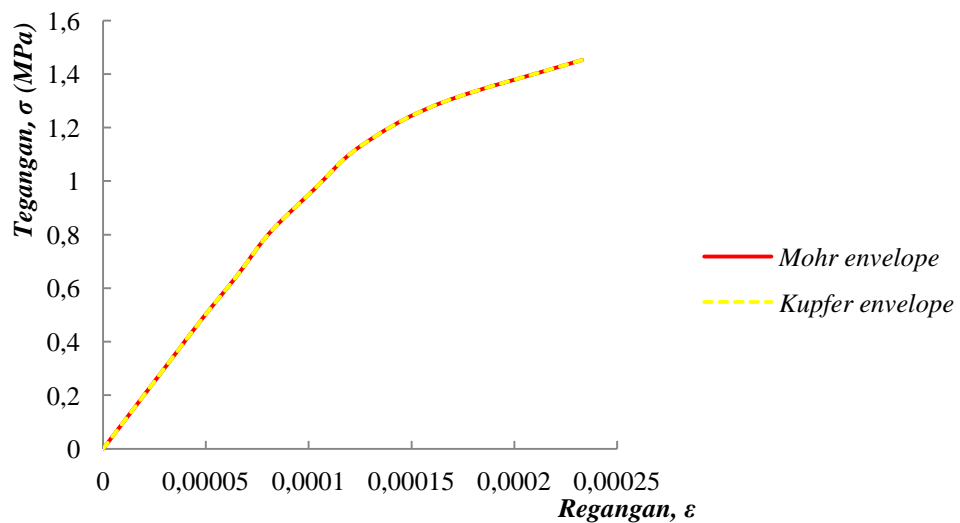


Gambar 9. (a) Retak awal pada titik-titik nodal, (b) Retak pada saat balok runtuh

ANALISIS PERILAKU RUPTURE

Hubungan Tegangan (σ) – Regangan (ϵ)

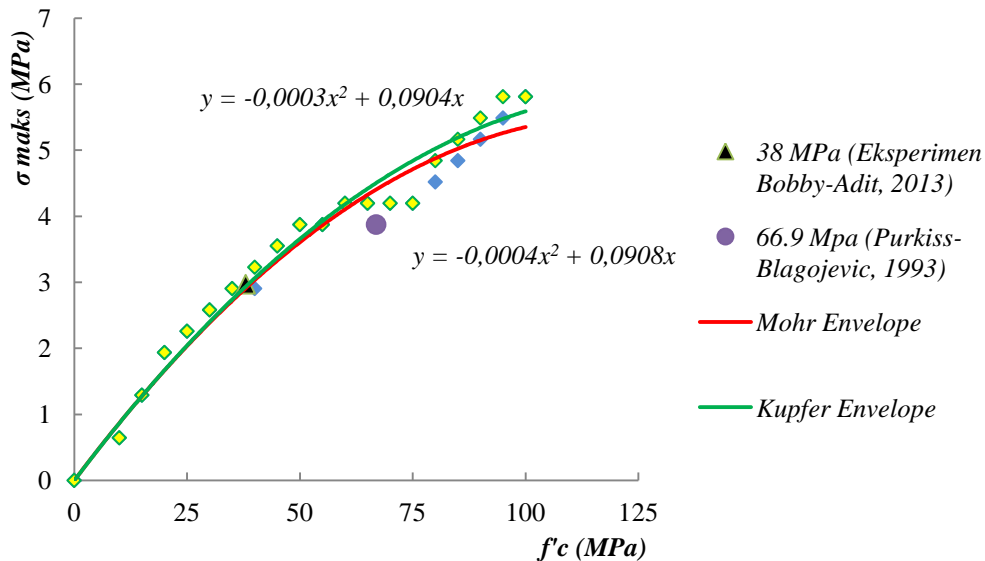
Kurva hubungan tegangan-regangan balok dengan f'_c 38 MPa diperlihatkan pada Gambar 10. Gambar tersebut menunjukkan bahwa hasil kurva menggunakan kriteria keruntuhan Mohr sama persis dengan Kupfer.



Gambar 11. Hubungan tegangan (σ) – regangan (ϵ) dengan f'_c 38 MPa

Hubungan Tegangan (σ) dengan Kuat Tekan Beton (f'_c)

Gambar 12 menunjukkan perbandingan hubungan tegangan maksimum (σ_{maks}) dengan kuat tekan beton (f'_c) antara kriteria keruntuhan Mohr dan Kupfer *envelope*. Kedua kurva tersebut berimpit hingga σ_{maks} 2,905 MPa pada f'_c 35 MPa tetapi setelah itu terdapat sedikit perbedaan. Kurva dengan kriteria keruntuhan Mohr terdapat deviasi kurva dengan Kupfer sebesar 0,96 MPa pada f'_c 100 MPa. Posisi σ_{maks} untuk mutu beton 38 MPa (hasil eksperimen) relevan dengan kurva yang dihasilkan dari simulasi numerik, sedangkan untuk mutu beton 66,9 MPa (Purkiss dan Blagojevic, 1993) posisinya menyimpang dari kurva tersebut.



Gambar 12. Perbandingan hubungan P_{maks} dengan f'_c antara Mohr dan Kupfer *envelope*

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Menghasilkan suatu program yang valid untuk memprediksi perilaku nonlinear material beton.
2. Program FEM yang dikembangkan menghasilkan respon beban yang lebih akurat daripada *displacement*-nya.
3. Program FEM ini dapat digunakan sebagai alat bantu untuk menganalisis respon *load-displacement* benda uji balok beton polos (tanpa tulangan) dan memprediksi pola keruntuhan awal yang terjadi.
4. Kelemahan yang masih terdapat dalam program FEM ini adalah:
 - a. *Increment* beban masih seragam, sehingga belum dapat memprediksi beban puncak yang terjadi secara akurat.
 - b. Program FEM yang telah dibuat memiliki ketidakstabilan terhadap input *increment* beban yang berbeda-beda.
 - c. Program FEM belum dapat menggambarkan perilaku material beton pasca beban puncak (*post-peak behavior*)

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, W. F. dan Saleeb, A. F. 1982. *Constitutive Equations for Engineering Material, Vol. 1: Elasticity and Modeling*. John Wiley and Sons, ISBN 0-471-09149-9.
- Cook, Robert D. 1990. *Konsep dan Aplikasi Metode Elemen Hingga*. Bandung : PT. Eresco.
- FIB Bulletin No. 42. 2008. *Constitutive Modeling of High Strength/High Performance Concrete*. ISBN 978-2-88394-082-6. Federation Internationale du Beton.
- FIB Bulletin No. 55 and 56. 2010. *Model Code 2010, First Complete Draft, Vol. 1 and 2*, ISBN 978-2-88394-095-3/6. Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.
- Fossen, Haakon. 2010. *Structural Geology*. New York: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-51664-8.
- Han, A. L. 2013. *Modeling the Stiffness Properties of the Aggregate-to-Mortar Interfacial Transition Zone*. Disertasi S3. Program Pascasarjana Teknik Sipil, Universitas Diponegoro.
- Hariwijaya, L. H. dan Laksono L. 2011. *Analisis Nonlinear Balok Beton Bertulang Menggunakan Metode Elemen Hingga dengan Pendekatan Smeared Crack*. Tugas Akhir S1. Teknik Sipil, Universitas Diponegoro.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., dan Rusch, H. 1969. *Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses*. ACI Journal, Proceedings Vol. 66 No. 8, August 1969.
- Kwak, H. G. and Filippou, F. C. 1990. *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structure Under Monotonic Loads*. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley. Report No. UCB/SEMM-90/14. November 1990.
- Nawy, E. G. Alih Bahasa Bambang Suryoatmono. 1985. *Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar*. Eresco.
- Park, R. dan Paulay, T. 1975. *Reinforced Concrete Structures*. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Purkiss, J. A. dan Blagojevic P. 1993. *Comparison between The Short and Long Term Behavior of Fiber Reinforced and Unreinforced Concrete Beams*. Composite Structures 0263-8223/93. Elsevier Science Publishers Ltd, England. Printed in Great Britain.