

MODELING OF REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMN SUBASSEMBLAGES SUBJECTED TO EARTHQUAKE TYPE LOADING USING VECTOR-5

PEMODELAN JOINT BALOK KOLOM BETON BERTULANG AKIBAT BEBAN GEMPA DENGAN VECTOR-5

Ridwan

Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Riau
Kampus Bina Widya km 12,5 Simpang Baru Panam Pekanbaru 28293
E-mail: ridwan@unri.ac.id dan iw4ndiunri@yahoo.com

ABSTRACT

This paper presents a numerical finite element modeling and analysis of an exterior reinforced concrete beam-column subassemblages subjected to earthquake type loading using VecTor5 software. In this study, the frame element was modeled with varying lengths of segments in the range of one half of the cross section depths. Three member types were used to represent the beam sections: MT1, MT2 and MT6 while three member types were defined for the column sections: MT3, MT4 and MT5. All default material behavior models were used in the analysis including the default concrete compression base curve (Hognestad). Two load cases were defined: a constant axial load and a beam tip displacement representing earthquake load. The results indicate that the overall behavior of the subassembly was predicted reasonably well. This has been confirmed with the insignificant difference between the analytical and experimental, i.e. the ratio of the predicted-to-observed peak load for all loading cycle had a mean of 1.12 with a coefficient of variation of 7.64%. The comparison shows that the VecTor5 nonlinear finite element program is capable of modeling and predicting the actual nonlinear behavior of specimen. The actual load-displacement relationship, load-longitudinal reinforcement strain and displacement-longitudinal reinforcement strain relationship have also been confirmed to be satisfactorily.

Keywords: beam-column joint; earthquake type loads; finite element; reinforced concrete; VecTor5

ABSTRACT

Makalah ini menyajikan simulasi elemen hingga numerik dan analisis eksterior beton bertulang balok-kolom subassemblages yang mengalami beban gempa menggunakan software VecTor5. Dalam studi ini, elemen frame dimodelkan dengan variasi panjang segmen di kisaran satu setengah dari ketinggian penampang. Tiga tipe batang yang digunakan untuk mewakili bagian balok: MT1, MT2 dan MT6 sementara tiga tipe balok didefinisikan untuk kolom bagian: MT3, MT4 dan MT5. Semua model perilaku bahan baku yang digunakan dalam analisis berdasar kurva tekan beton (Hognestad). Dua pembeban yaitu: beban aksial konstan dan displasemen tip balok sebagai beban gempa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku keseluruhan subassembly yang diperkirakan cukup baik. Hal ini telah dikonfirmasi antara analitis dan eksperimental dengan perbedaan yang tidak signifikan, yaitu rasio dari perkiraan beban puncak diamati untuk semua siklus pembebanan memiliki rata-rata 1,12 dengan koefisien variasi 7,64%. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa program elemen hingga nonlinier VecTor5 mampu memodelkan dan memprediksi perilaku nonlinier spesimen. Hubungan beban-lendutan, beban-regangan tulangan memanjang dan lendutan-membujur hubungan penguatan regangan yang sebenarnya juga telah dikonfirmasi dengan hasil memuaskan.

Kata-kata Kunci: joint balok-kolom; beban gempa; elemen hingga; beton bertulang; VecTor5

PENDAHULUAN

Struktur beton bertulang didesain untuk memenuhi kriteria keamanan (*safety*) dan layak-pakai (*serviceability*). Untuk memenuhi kriteria layak-pakai maka besarnya retak dan lendutan struktur pada kondisi beban kerja harus dapat diestimasi dan memenuhi kriteria tertentu. Sedangkan untuk memenuhi kriteria keamanan maka struktur harus didesain mempunyai suatu angka keamanan terhadap beban runtuh, karena itu perkiraan besarnya beban runtuh (batas) sangat penting. Selain nilai absolut beban yang menyebabkan keruntuhan, maka perilaku struktur saat runtuh juga perlu diketahui, apakah bersifat daktail (mengalami deformasi besar sebelum runtuh), atau tiba-tiba (non-daktail).

Untuk mengetahui beban batas dan perilaku struktur yang dibebani maka uji eksperimental menjadi alat utama untuk mengevaluasi keandalan metode analitis yang digunakan. Dalam perkembangannya, uji simulasi komputer dengan metode elemen hingga dapat mengurangi jumlah materi uji yang harus digunakan dalam uji eksperimental, sehingga biayanya dapat dikurangi.

Beberapa dekade terakhir, penelitian intensif dalam bidang rekayasa struktur telah memberikan kita pemahaman yang baik akan perilaku struktur khususnya perilaku struktur beton bertulang akibat beban baik lentur maupun geser. Hasilnya, metode

analisis baru telah diterapkan dalam berbagai peraturan perencanaan struktur beton bertulang seperti ACI318-08 di Amerika dan SNI-03-2847-2002 di Indonesia.

Pada saat yang sama, kemajuan teknologi komputer memberikan banyak kemudahan bagi perencana struktur untuk mendesain dan menganalisis berdasarkan peraturan yang baru dengan lebih mudah dan lebih cepat. Prosedur analisis didasarkan pada prinsip-prinsip elastis linear. Meskipun prinsip elastis linear ini tidak dapat memprediksi semua aspek struktur secara akurat (seperti retak pada beton dan deformasi akibat beban layan), tetapi cukup baik digunakan untuk menganalisis struktur daktail dengan mode keruntuhan lentur. Saat ini ada banyak *software* yang dapat mendesain dan menganalisis struktur menggunakan prinsip-prinsip elastis linear.

Kadangkala kita perlu menganalisis struktur untuk mendapatkan perilakunya dengan lebih akurat untuk berbagai keperluan antara lain, (1) pengujian kekuatan, keamanan dan keandalan struktur bangunan yang telah rusak, struktur yang didisain dan dibangun menggunakan aturan lama, (2) pengujian perilaku struktur yang sedang direncanakan, (3) pengujian perilaku struktur yang akan diperbaiki (*retrofitted structures*) atau untuk mendapatkan metode perbaikan struktur yang rasional, dan (4) analisis forensik pada kasus bangunan yang gagal atau runtuh serta

banyak kegunaan lainnya. Ada banyak *software* yang bisa digunakan untuk menganalisis struktur dengan mekanisme keruntuhan lentur dominan, di antaranya SAP2000. Namun tidak demikian halnya untuk struktur perilakunya dipengaruhi oleh mekanisme geser. Alasannya adalah perilaku geser beton bertulang belum dipahami dengan baik; sehingga keakuratan pemodelan perilaku geser sulit untuk dijabarkan, walaupun banyak pendekatan teori dan model konstitutif yang telah diusulkan.

Tabel 1. Sifat model perilaku material beton dan tulangan VecTor5

Perilaku beton	Model
Compression Base Curve	Hognestad (parabola)
Compression Post-Peak	Modified Park-Kent
Compression Softening	Vecchio 1992-A
Tension Stiffening	Modified Bentz
Tension Softening	Linear
Tension Splitting	Not Considered
Confinement Strength	Kupfer/Richart
Dilatation	Variable - Kupfer
Cracking Criterion	Mohr - Coulomb
Crack Width Check	Crack Limit (agg/5)
Hysteresis	NL (Vecchio)
Slip Distortion	Vecchio - Lai
Perilaku tulangan	Model
Hysteresis	Seekin w/ Bauschinger
Dowel Action	Tassios (Crack Slip)
Strain Rate Effects	Malvar dan Crawford
Analysis Options	Model
Geometric Nonlinearity	Considered
Shear Analysis Mode	Parabolic Shear Strain
Shear Protection	On
Convergence Limit	1,00001
Max. No Of. Iterations	100

Salah satu program komputer yang menyediakan fasilitas simulasi perilaku struktur beton bertulang tersebut adalah VecTor5. VecTor5 adalah *software* analisis nonlinear untuk struktur frame 2 dimensi yang terdiri dari balok, kolom dan dinding geser, dengan berbagai simulasi pembebanan antara lain beban statik, beban dinamik dan beban akibat temperatur. Program yang digunakan dalam penelitian ini adalah VecTor5 Basic versi 3.1. VecTor5 Basic dapat digunakan untuk memodelkan elemen frame sebanyak 50 elemen. *Software* ini dikembangkan berdasarkan teori *Modified Compression Field* (Vecchio and Collins, 1986) dan *Disturbed Stress Field Model* (Vecchio, 2000) dengan sifat perilaku material baik beton maupun tulangan yang disediakan adalah seperti yang disajikan pada Tabel 1.

METODE PENELITIAN

Satu seri pengujian joint balok kolom dilakukan oleh Duane L.N. Lee di Universitas Michigan tahun 1976 untuk menyelidiki perilaku benda uji joint balok kolom eksterior oleh beban gempa terhadap beberapa parameter. Parameter yang ditinjau dalam penelitian tersebut adalah jumlah sengkang yang dipasang di daerah joint, pola pembebanan, dan sifat material bahan. Benda uji yang digunakan berjumlah 8 buah dan dikelompokkan menjadi 2 tipe, tipe I dan tipe II. Benda uji tipe I, didesain menggunakan peraturan ACI 318-71 untuk daerah yang tidak dipengaruhi oleh gempa dan Benda uji tipe II, didesain menggunakan peraturan ACI 318-71 Appendix A dengan memperhitungkan pengaruh beban gempa. Benda uji nomor 2 sebagai bagian dari benda uji tipe II dengan pola pembebanan gempa

kuat dan mode kerusakan terjadi diluar daerah joint, dipilih sebagai tinjauan analisis dalam penelitian ini.

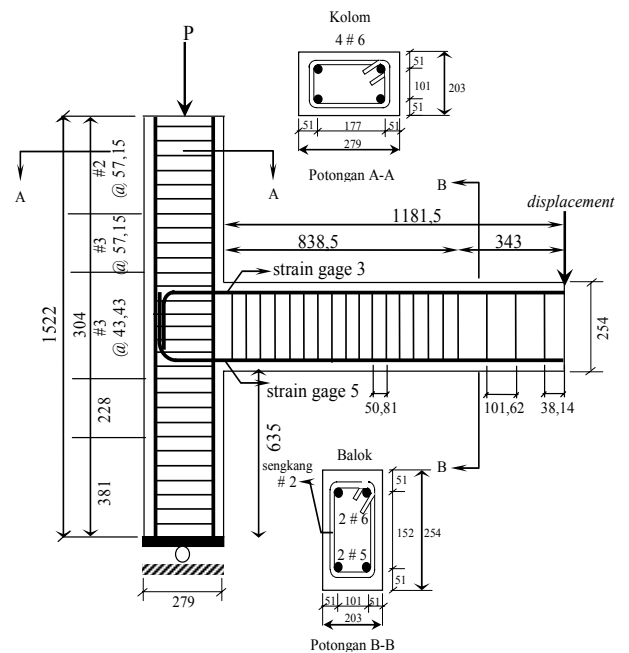
Detail Benda Uji

Kolom memiliki penampang persegi empat dengan dimensi 203 mm x 279 mm dan tinggi 1522 mm. Balok memiliki penampang persegi empat ukuran 203 mm x 254 mm dan panjang 1181,5 mm. Untuk tulangan longitudinal atas balok dipasang 2 buah tulangan #6 dan tulangan bawah dipasang 2 buah tulangan #5, sementara untuk kolom digunakan 4 buah tulangan #6. Ukuran dan detail penulangan benda uji nomor 2 dapat dilihat pada Gambar 1. dan sifat bahan tulangan dan beton disajikan pada Tabel 2.

Sifat bahan pada Tabel 2, diperoleh dari hasil uji tarik tulangan dan uji desak beton yang dilakukan oleh Lee (1976). Sedangkan nilai modulus elastis beton (E_c) dan regangan beton (ϵ_0) dihitung dengan persamaan (1) dan persamaan (2).

$$E_c = 3320 \times \sqrt{f'_c} + 6900 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\epsilon_0 = \frac{2 \times f'_c}{E_c} \quad (2)$$



Gambar 1. Detail penulangan benda uji joint balok kolom no 2 (Lee, 1976), ukuran dalam mm.

Prosedur Pengujian

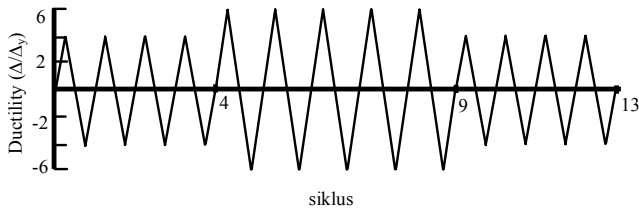
Beban aksial tetap sebesar 177,8 kN (40 kips) diberikan lebih dulu pada kolom sebelum beban siklik pada balok bekerja. Setelah itu beban gempa yang berupa beban siklik disimulasikan dengan memberikan *displacement* pada ujung balok menggunakan *hydraulic actuator*. *Displacement ductility* adalah perbandingan antara *displacement* yang diberikan pada benda uji dengan *displacement* yang terjadi pada saat tulangan atas balok mencapai tegangan luluh pertama. Pemberian beban gempa pada ujung balok berupa *displacement* selalu dimulai dari kondisi tulangan atas balok mengalami tarik.

Tabel 2. Sifat bahan tulangan dan beton benda uji

	Tulangan benda uji							Beton benda uji		
	db (mm)	f _y (MPa)	f _u (MPa)	E _s (MPa)	E _{sh} (MPa)	ε _{sh} (× 10 ⁻³)	ε _u (× 10 ⁻³)	f _c ' (MPa)	ε ₀ (× 10 ⁻³)	E _c (MPa)
#2	6.35	320.68	358.65	210970.46	2000.00	3.00	133.00	29.5	2.37	24943.17
#3	9.53	343.18	517.58	196905.77	2000.00	8.31	31.47	Keterangan : #6b dipasang di balok #6k dipasang di kolom		
#5	15.88	383.26	630.80	196202.53	2000.00	13.9	42.87			
#6b	19.05	341.80	575.25	210970.46	2000.00	9.98	36.20			
#6k	19.05	548.50	871.31	196905.77	2000.00	2.87	133.00			

Pemodelan Numerik benda uji

Model numerik elemen frame dan penampang benda uji joint balok kolom dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Dalam pembuatan model frame, elemen frame (balok dan kolom) dibagi menjadi menjadi pias-pias elemen kecil. Untuk akurasi perhitungan, Guner (2008) merekomendasikan untuk menggunakan panjang pias sekitar 50% dari tinggi penampang balok dan kolom. Kemudian penampang balok dan kolom beton bertulang



Gambar 2. Pola riwayat pembebanan

dibagi menjadi 30 sampai dengan 40 lapisan untuk mendapatkan akurasi perhitungan yang baik. Ukuran lapisan beton pada bagian atas dan bawah dibuat lebih tipis dari bagian yang lainnya karena distribusi regangan pada daerah tersebut lebih besar. Senggang yang terpasang didistribusikan pada tiap-tiap lapisan tadi menjadi rasio tulangan yang dihitung dengan persamaan 3) dan persamaan 4).

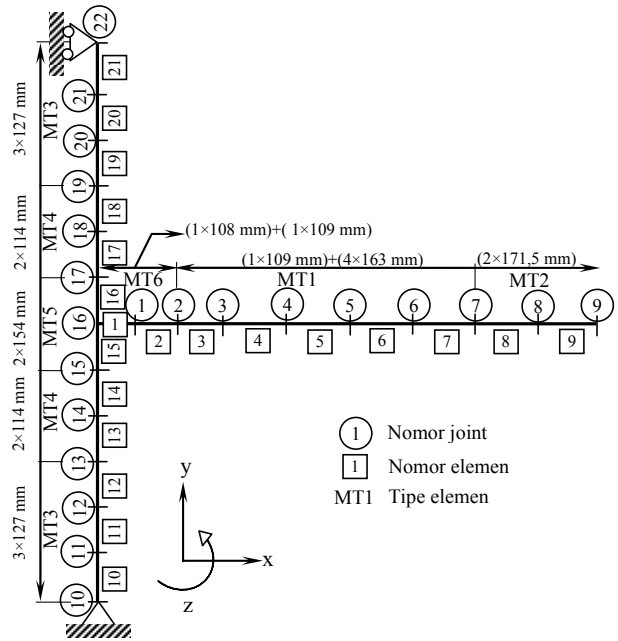
$$\rho_z = \frac{A_b}{s_t \times t_o} \tag{3}$$

$$\rho_t = \frac{n \times A_b}{s_t \times b} \tag{4}$$

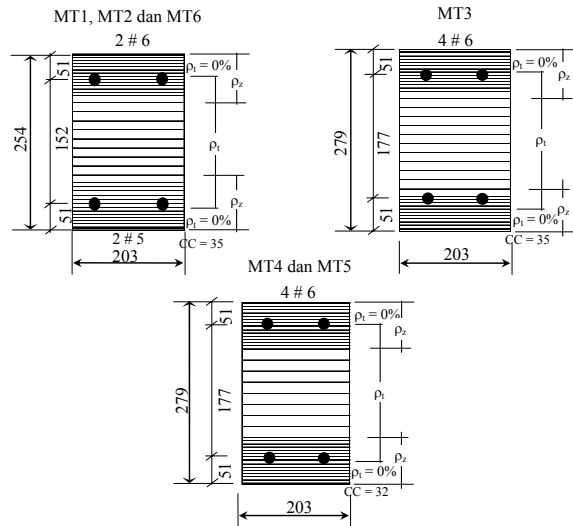
dengan A_b adalah luas sengkang, s_t adalah jarak sengkang, dan t_o adalah jarak selebar 2×(5,5 ~ 6,0×diameter sengkang) dan b adalah lebar penampang beton pada lapisan yang ditinjau (CEB-FIP, 1990).

Tiga tipe elemen digunakan untuk memodelkan penampang balok: MT1, MT2 dan MT6 dan 3 elemen untuk memodelkan penampang kolom: MT3, MT4 dan MT5. Panjang pias elemen balok dimuka kolom yang dimodelkan sebagai MT6 dibuat lebih kecil untuk mendapatkan hasil bacaan respon tulangan yang lebih baik pada *strain gage* 3 dan *strain gage* 5. Distribusi rasio sengkang yang digunakan untuk tiap tipe penampang disajikan pada Tabel 3.

Benda uji dikekang pada arah sumbu x dan sumbu y pada joint 10 dan joint 22 hanya dikekang pada arah sumbu x. Beban aksial tetap bekerja pada joint 22 dan pada saat yang bersamaan beban gempa berupa beban bolak-balik seperti yang terlihat pada Gambar 2 diberikan pada joint 9. Pemberian beban gempa pada ujung balok berupa *displacement* selalu dimulai dari kondisi tulangan atas balok mengalami tarik.



Gambar 3. Penomoran joint dan elemen model numerik benda uji



Gambar 4. Pemodelan penampang balok dan kolom

Seperti terlihat pada Gambar 4, penampang tipe MT1, MT2 dan MT6 dibagi menjadi 38 lapisan beton (2,5 mm x 2, 5 mm x 6, 5 mm x 6, 11 mm x 1, 12,75 mm x 8, 11 mm x 1, 5 mm x 6, 5 mm x 6, dan 2,5 mm x 2). Penampang tipe MT3 dibagi menjadi 40 lapisan beton (2,5 mm x 2, 5 mm x 6, 5 mm x 6, 11 mm x 1, 12,7 mm x 8, 11 mm x 1, 5 mm x 6, 5 mm x 6, dan 2,5 mm x 2) dan penampang tipe MT4 serta MT5 dibagi menjadi 40 lapisan beton (2,0 mm x 1, 5 mm x 6, 5 mm x 1, 2 mm x 1, 5 mm x 7, 16,375 mm x 8, 5 mm x 7, 2 mm x 1, 5 mm x 1, 5 mm x 6, dan 2,5 mm x 2).

Tabel 3. Tipe penampang dan rasio tulangan sengkang yang digunakan pada model

Tipe penampang	ρ_t (%)	ρ_z (%)
MT1	0,61	0,82
MT2	0,31	0,41
MT3	0,55	0,73
MT4	1,23	1,69
MT5	2,46	3,38
MT6	1,22	1,64

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 5 memperlihatkan bahwa perilaku benda uji dapat diprediksi dengan baik melalui model yang diusulkan. Pada siklus pertama pembebanan positif, hasil eksperimen dan analisis memperlihatkan kurva beban-defleksi sebelum tulangan atas mengalami luluh tampak linear. Setelah tulangan atas luluh, kurva beban-defleksi tidak lagi linear dan kekakuannya berkurang. Bagian pelepasan beban (*unloading portion*) pada kurva tersebut juga tampak memiliki kemiringan yang hampir sama dengan kemiringan kurva saat pemberian beban (*loading portion*). Pada pembebanan negatif, kurva beban-defleksi baik hasil eksperimen maupun hasil analisis terlihat mulus dengan posisi beban negatif saat luluh kurang jelas terlihat. Bagian pelepasan beban (*unloading portion*) untuk siklus pertama pembebanan negatif ini memiliki kemiringan yang lebih kecil dari bagian pemberian beban (*loading portion*). Kurva hubungan beban – lendutan sangat dipengaruhi oleh “Bauschinger Effect”, retak yang terjadi dan slip antara tulangan dengan beton (Lee, 1976).

Perbandingan kurva beban – regangan dan lendutan – regangan yang terjadi pada tulangan atas dan tulangan bawah balok hasil eksperimen dan hasil analisis disajikan pada Gambar 6. Regangan tulangan atas dan bawah balok benda uji dapat diprediksi dengan baik melalui model yang diusulkan. Tulangan atas balok hasil eksperimen luluh pada beban 27,78 kN, sementara tulangan hasil analisis luluh pada beban 29,85 KN dengan selisih 6,9%. Sedangkan tulangan bawah balok hasil eksperimen luluh pada beban 15,53 kN dan tulangan hasil analisis luluh pada beban 20,21 KN dengan selisih 23,2%.

Tabel 4 memperlihatkan perbandingan beban – beban puncak positif tiap – tiap siklus pembebanan hasil analisis dan eksperimen. Dari table tersebut terlihat beban – beban dapat

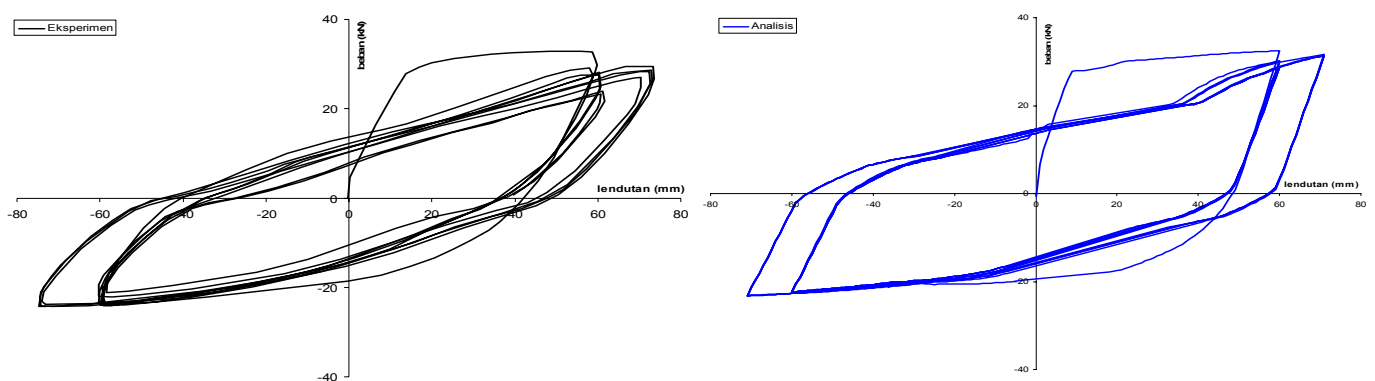
dipredikasi dengan baik dan selisih beban yang diperoleh dari hasil analisis dengan beban hasil eksperimen tidak begitu jauh. Rata – rata rasio beban-beban puncak hasil analisis dengan eksperimen adalah 1,12 dengan standar deviasi 7,64%.

Tabel 4. Perbandingan beban – beban puncak positif hasil analisis dan eksperimen

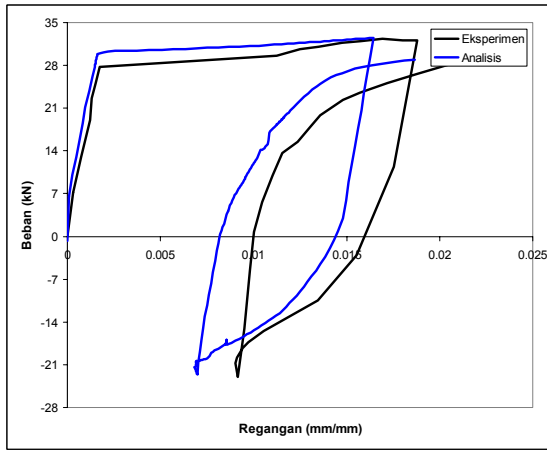
Siklus	Beban (kN)		Rasio
	Eksperimen	Analisis	
1	32,71	32,51	0,99
2	29,17	30,14	1,03
3	27,81	29,91	1,08
4	27,69	29,86	1,08
5	29,40	31,66	1,08
6	28,60	31,39	1,10
7	28,26	31,35	1,11
8	27,01	31,34	1,16
9	26,55	31,34	1,18
10	23,93	28,69	1,20
11	23,59	28,73	1,22
12	23,25	28,74	1,24
		Rerata	1,12
		deviasi	7,64%

KESIMPULAN

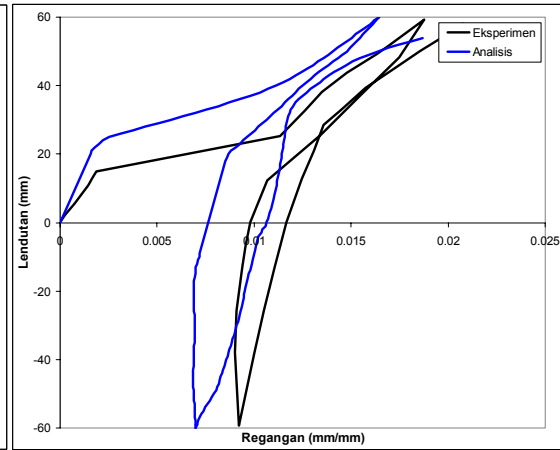
Hasil analisis dengan model numerik yang dilakukan menunjukkan bahwa perilaku benda uji dapat diprediksi dengan baik dan akurat. Hal ini dapat dilihat dari grafik hubungan beban – lendutan dan grafik hubungan beban – regangan serta grafik hubungan lendutan – regangan pada tulangan atas dan tulangan bawah balok. Persentase selisih beban pada saat tulangan atas dan tulangan bawah leleh masing-masing adalah 6,9% dan 23,2% dan rata – rata rasio beban-beban puncak hasil analisis dengan eksperimen adalah 1,12 dengan standar deviasi 7,64%.



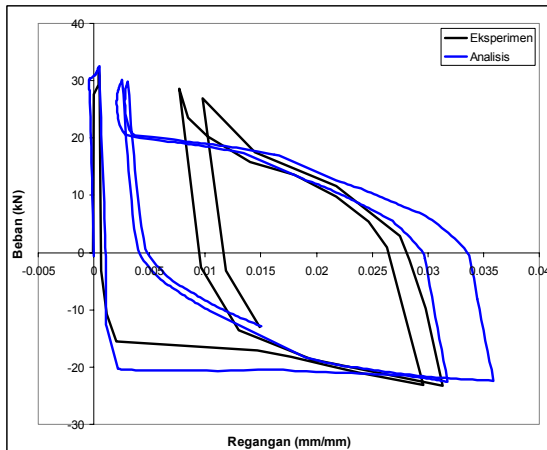
Gambar 5. Perbandingan kurva beban – lendutan hasil eksperimen dan analisis



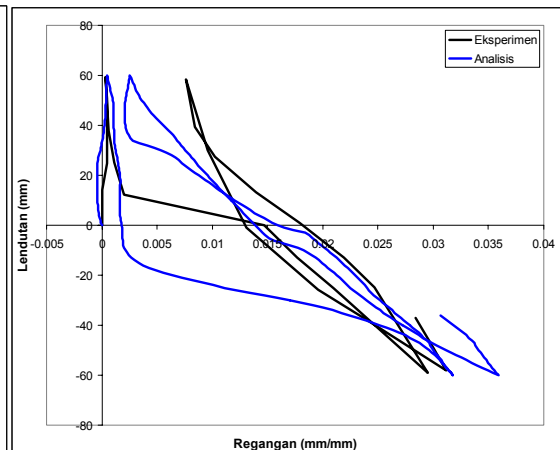
a. Kurva beban – regangan pada *strain gage* 3



b. Kurva lendutan – regangan pada *strain gage* 3



c. Kurva beban – regangan pada *strain gage* 5



d. Kurva lendutan – regangan pada *strain gage* 5

Gambar 6. Perbandingan hasil bacaan regangan tulangan hasil eksperimen dan analisis pada *strain gage* 3 dan 5

DAFTAR PUSTAKA

- CEB-FIP. (1990). "Model Code for Concrete Structures, Design Code", *Comité EUROInternational du Béton*, 437 pp.
- Dewobroto, W. (2005). "Simulasi Keruntuhan Balok Beton Bertulang Tanpa Sengkang Dengan ADINA™." *Prosiding Seminar Nasional : Rekayasa Material dan Konstruksi Beton 2005*.
- Lee, D.L.N. (1976). "Original and Repaired Reinforced Concrete Beam-Column Subassemblages Subjected to Earthquake Type Loading". *Report UMEE 76S4, Department of Civil Engineering*, The University of Michigan, 206 pp. (available in the Publications section of <http://deepblue.lib.umich.edu/>) [Akses 17 Februari 2010]
- Güner, S. (2008). "Performance Assesment of Shear-Critical Reinforced Concrete Plane Frames." PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 429 pp. (available in the Publications section of <http://www.civ.utoronto.ca/vector/>) [Akses 10 Januari 2010]
- Güner, S. et al. (2008). "User's Manual of VecTor5." (available in the Publications section of <http://www.civ.utoronto.ca/vector/>) [Akses 10 Januari 2010]
- Güner, S. et al. (2010). "Pushover Analysis of Shear-Critical Frames: Verification and Application", *ACI Structural Journal*, V. 107, No. 1, Jan-Feb., pp. 72-81.
- Vecchio, F. J. et al. (1986). "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear." *ACI Journal*, V.83, No.2, pp.219-231.
- Vecchio, F. J. (2000). "Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation." *Journal of Structural Engineering*, V.126, No.9, pp. 1070-1077.