

JURNAL TEKNIK SIPIL

Pengaruh Panjang Penyaluran Terhadap Kuat Cabut Tulangan Baja

(*Arusmalem Ginting, Tri Wahyu Purnomo*)

Pemanfaatan Obyek 4D pada Perencanaan / Pelaksanaan Proyek Pengadiln Negeri Cianjur Jawa Barat

(*Maksum Tanubrata*)

Pengaruh Jenis Baja Tulangan Terhadap Perilaku Plastifikasi Elemen Struktur SRPMK

(*Iswandi Imran, R. Simatupang, E. Pamujie, M. Gunawan*)

Pemodelan Numerik Perilaku Keruntuhan Balok Tinggi Beton Bertulang

(*Yosafat Aji Pranata, Bambang Suryoatmono*)

Pengembangan Sistem Elemen Pengikat Untuk Meningkatkan Efektifitas Kekangan Kolom Bangunan Tahan Gempa

(*Kristianto, A., Imran, I., Suarjana, M.*)

J. Tek.Sipil	Vol. 6	No. 1	Hlm.1-77	Bandung, April 2010	ISSN 1411-9331
--------------	--------	-------	----------	---------------------------	-------------------



JURNAL TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS KRISTEN MARANATHA

Jurnal Teknik Sipil adalah jurnal ilmiah jurusan teknik sipil Universitas Kristen Maranatha yang diterbitkan 2 kali setahun pada bulan April dan Oktober. Pertama kali terbit bulan Oktober 2003. Tujuan penerbitan adalah sebagai wadah komunikasi ilmiah dan juga penyebarluasan hasil penelitian, studi literatur dalam bidang teknik sipil atau ilmu terkait. Bila pernah dipresentasikan pada seminar agar diberi keterangan lengkap.

Pelindung	: Rektor Universitas Kristen Maranatha
Penanggung Jawab	: Dekan Fakultas Teknik Universitas Kristen Maranatha
Pemimpin Redaksi	: Ir. Maksum Tanubrata, MT.
Ketua Dewan Penyunting	: Yosafat Aji Pranata, ST., MT.
Penyunting Pelaksana	: Dr. Ir. Budi Hartanto Susilo, M.Sc. Ir. Maria Christine, M.Sc. Ir. Herianto Wibowo, M.Sc. Anang Kristianto, ST., MT. Andrias Suhendra Nugraha, ST., MT.
Desain Visual dan Editor	: Aldrin Boy
Sekretariat dan Sirkulasi	: Dra. Dorliana
Alamat Redaksi	: Sekretariat Jurnal Teknik Sipil Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha Jl. Prof. drg. Suria Sumantri MPH. No. 65 Bandung 40164 Tel. 022 - 2012186 ext. 212 Fax. 022 - 2017622
E-mail	: jurnal_ts@eng.maranatha.edu
Penerbit	: Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha Jl. Prof. drg. Suria Sumantri MPH. No. 65 Bandung 40164



JURNAL TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS KRISTEN MARANATHA

DAFTAR ISI :

Pengaruh Panjang Penyaluran Terhadap Kuat Cabut Tulangan Baja (<i>Arusmalem Ginting, Tri Wahyu Purnomo</i>)	1 - 9
Pemanfaatan Obyek 4D pada Perencanaan / Pelaksanaan Proyek Pengadilan Negeri Cianjur Jawa Barat (<i>Maksum Tanubrata</i>)	10 - 31
Pengaruh Jenis Baja Tulangan Terhadap Perilaku Plastifikasi Elemen Struktur SRPMK (<i>Iswandi Imran, R. Simatupang, E. Pamujie, M. Gunawan</i>)	32 - 45
Pemodelan Numerik Perilaku Keruntuhan Balok Tinggi Beton Bertulang (<i>Yosafat Aji Pranata, Bambang Suryoatmono</i>)	46 - 62
Pengembangan Sistem Elemen Pengikat Untuk Meningkatkan Efektivitas Kekangan Kolom Bangunan Tahan Gempa (<i>Kristianto, A., Imran, I., Suarjana, M.</i>)	63 - 77

PENGARUH PANJANG PENYALURAN TERHADAP KUAT CABUT TULANGAN BAJA

Arusmalem Ginting, Tri Wahyu Purnomo

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra
Jl. Tentara Rakyat Mataram No. 55-57, Yogyakarta, email : agintm@yahoo.com

ABSTRAK

Salah satu persyaratan dalam perancangan beton bertulang yang harus diperhatikan adalah panjang penyaluran tulangan. Panjang penyaluran adalah panjang penambatan yang diperlukan untuk mengembangkan tegangan luluh pada tulangan yang merupakan fungsi dari tegangan luluh baja, diameter tulangan, dan tegangan lekat. Panjang penyaluran menentukan tahanan terhadap tergelincirnya tulangan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh panjang penyaluran terhadap kuat cabut tulangan baja dari beton. Pada penelitian ini digunakan 12 buah benda uji kuat cabut yang berupa silinder beton dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pada bagian tengah silinder ditanam tulangan ulir berdiameter 16,4 mm dengan panjang penyaluran tulangan (l_d) dibuat bervariasi. Variasi panjang penyaluran yang digunakan adalah: 50, 100, 150, 200, 250, dan 300 mm. Jumlah benda uji untuk masing-masing variasi panjang penyaluran sebanyak dua buah. Pengujian kuat lekat dilakukan dengan cara menempatkan silinder beton pada *loading frame* yang dilengkapi dengan *hydraulic jack* dan *load cells*, batang tulangan yang tertanam pada silinder ditarik sampai tercabut. Hasil pengujian yang didapat berupa data beban cabut maksimum. Dari hasil penelitian ini didapat kuat tekan rata-rata silinder beton sebesar 27,63 MPa. Tegangan luluh rata-rata tulangan D16,4 sebesar 483,66 MPa. Peningkatan panjang penyaluran dari 50, 100, 150, 200, 250, hingga 300 mm meningkatkan kemampuan benda uji untuk mendukung gaya cabut. Kuat cabut meningkat dan berbanding lurus sampai panjang penyaluran tertentu. Kegagalan pada uji cabut tulangan dapat berupa tulangan tercabut beton utuh atau tulangan tercabut beton terbelah.

Kata kunci : panjang penyaluran, kuat cabut.

ABSTRACT

One of the factors that must to be calculating in the design of the reinforced concrete was development length of reinforcement. Development length is anchor length required to develop yield stress of reinforcing bar which is a function of yield strength of the reinforcement, diameter of the reinforcement bar, and bond stress. Development length determined resistance against slippage of reinforcement. The aim of this research was to know the influence of development length against pullout strength of reinforcement from the concrete. In this research was used 12 samples of the pullout used the concrete cylinder 150 x 300 mm. A single deformed bar diameter 16.4 mm was embedded in a concrete cylinder with development length be varied. The development length that was used: 50, 100, 150, 200, 250, and 300 mm. Each variation development length was used two samples. The testing of pullout in loading frame that was equipped with hydraulic jack and load cells, then reinforcing bar was embedded in a concrete cylinder pullout. Results of the testing that was maximum pullout strength. The results of this research was gotten average compression strength of concrete cylinder was 27.63 MPa. Average yield stress of deformed steel bar D16.4 was 483.66 MPa. Increased the development length from 50 mm to 300 mm will increase the pullout strength. Pullout strength increased linearly until certain development length. There were two types pullout failure that is reinforcing bar was pullout and the concrete was not split or reinforcing bar was pullout and the concrete was split.

Key words: development length, pullout strength.

1. PENDAHULUAN

Beton banyak digunakan sebagai bahan bangunan karena harganya relatif murah, kuat tekannya tinggi, dapat dibuat sesuai dengan bentuk dan ukuran yang diinginkan, dapat dikombinasikan dengan baja tulangan, dan masih banyak lagi kelebihan-kelebihan yang lain. Beton mempunyai kekuatan yang besar dalam menahan gaya tekan (*compression*), tetapi lemah dalam menahan gaya tarik. Bagian beton yang menahan gaya tarik diperkuat atau digantikan oleh baja tulangan.

Salah satu dasar anggapan yang digunakan dalam perencanaan dan analisis struktur beton bertulang adalah lekatan batang tulangan baja dengan beton yang mengelilinginya berlangsung sempurna tanpa terjadi penggelinciran atau pergeseran. Berdasarkan atas anggapan tersebut maka pada waktu komponen struktur beton bertulang bekerja menahan beban akan timbul tegangan lekat pada permukaan singgung antara batang tulangan dengan beton (Dipohusodo, 1994).

Tulangan polos dapat terlepas dari beton karena terbelah di arah memanjang bila adhesi atau perlawanan gesek cukup tinggi, atau dapat terlepas keluar dengan meninggalkan lobang bulat di dalam beton untuk adhesi dan tahanan gesek yang rendah. Batang tulangan berprofil direncanakan untuk merubah pola perilaku dan memperkecil andalan atas gesekan dan adhesi, dan lebih mengandalkan tahanan dari gerigi terhadap beton. Keruntuhan lekatan (*bond failure*) tulangan berprofil di dalam beton berbobot normal hampir selalu merupakan keruntuhan akibat terbelahnya beton. Pada pola keruntuhan pembelahan ini, beton terbelah menjadi dua atau tiga bagian karena aksi baji (*wedging*) dari gerigi terhadap beton (Wang, 1993).

Salah satu persyaratan dalam perancangan beton bertulang yang harus diperhatikan adalah panjang penyaluran tulangan. Menurut Dipohusodo (1994), panjang penyaluran adalah panjang penambatan yang diperlukan untuk mengembangkan tegangan luluh pada tulangan yang merupakan fungsi dari tegangan luluh baja (f_y), diameter tulangan, dan tegangan lekat. Panjang penyaluran menentukan tahanan terhadap tergelincirnya tulangan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh panjang penyaluran terhadap kuat cabut tulangan baja dengan beton.

2. TINJAUAN LITERATUR

Menurut Nawy (1998) kuat lekat antara tulangan dan beton merupakan hasil dari berbagai parameter, seperti lekatan antara beton dengan permukaan tulangan baja dan tekanan beton terhadap tulangan akibat adanya susut pengeringan pada beton. Gesekan

antara tulangan baja dan beton juga meningkatkan tahanan terhadap gelincir. Efek total ini disebut sebagai lekatan (*bond*). Kuat lekat tulangan dengan beton tergantung pada faktor-faktor utama sebagai berikut:

- lekatan antara beton dan tulangan baja
- efek *gripping* (memegang) sebagai akibat dari susut pengeringan beton di sekeliling tulangan
- tahanan gesekan terhadap gelincir dan saling mengunci pada saat tulangan mengalami tegangan tarik
- efek kualitas beton (kekuatan tarik dan tekannya)
- efek penjangkaran ujung tulangan
- diameter, bentuk dan jarak tulangan.

Berdasarkan SKSNI T-15-1991-03 panjang penyaluran dasar (l_{db}) tulangan baja tarik D36 atau lebih kecil dapat dihitung dengan Persamaan 1. berikut ini.

$$l_{db} = \frac{0,02 \cdot A_b \cdot f_y}{\sqrt{f'_c}} \geq 0,06 \cdot d_b \cdot f_y \quad (1)$$

dengan:

- l_{db} = panjang penyaluran dasar (mm)
- d_b = diameter nominal batang tulangan baja (mm)
- A_b = luas penampang batang tulangan baja (mm²)
- f_y = tegangan luluh baja (MPa)
- f'_c = kuat tekan beton (MPa)

Untuk mendapatkan panjang penyaluran (l_d) yang diperlukan, panjang penyaluran dasar (l_{db}) dikalikan dengan faktor modifikasi sesuai dengan peruntukannya. Dalam segala hal panjang penyaluran l_d tidak boleh kurang dari 300 mm.

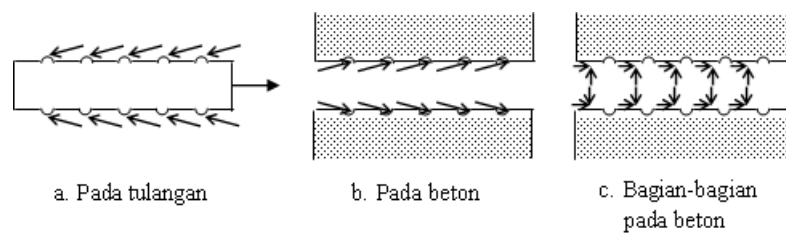
Ahmed dkk (2007) melakukan penelitian pengaruh panjang penyaluran terhadap 24 sampel beton mutu tinggi dan beton normal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan menambah panjang penyaluran dari $5d_b$ ke $10d_b$ kekuatan lekat bertambah baik untuk beton mutu tinggi maupun beton normal.

Karena mudah dalam pembuatan dan sederhana dalam pengujian maka *pull out test* banyak dipakai oleh para peneliti untuk mengevaluasi lekatan tulangan dengan beton. Pada *pull out test* tulangan ditarik dari beton sehingga beton di sekelilingnya mengalami tekan. Perilaku lekatan yang sebenarnya terjadi pada balok beton bertulang tidak seperti

pada *pull out test*, tulangan dan beton di sekelilingnya keduanya mengalami tarik (Elagroudy, 2003).

Ada dua macam mekanisme kegagalan pada *pull out test*. Jenis kegagalan yang pertama adalah terbelahnya penutup beton dan jenis kegagalan yang kedua adalah tercabutnya tulangan. Ada beberapa parameter yang mengakibatkan kegagalan diantaranya adalah: jenis beban, besar beban, ketebalan penutup beton, diameter tulangan, kekangan terhadap tulangan, dan bentuk tulangan (Alavi-Fard dan Marzouk, 2004).

Gaya-gaya interaksi antara tulangan berprofil dan beton sekeliling dapat dilihat pada Gambar 1. berikut ini (Wang, 1993).



Gambar 1. Gaya-gaya diantara tulangan dan beton

3. CARA PENELITIAN

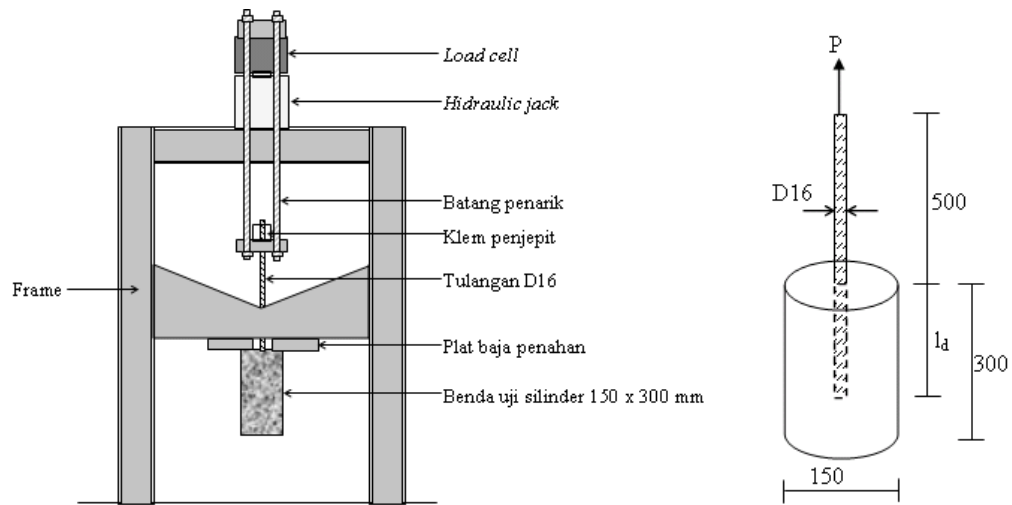
3.1 Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari benda uji silinder beton untuk pengujian kuat tekan, benda uji kuat tarik baja, dan benda uji kuat lekat. Benda uji kuat lekat (*pull out test*) berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pada bagian tengah silinder ditanam tulangan ulir berdiameter 16,4 mm dengan panjang penyaluran tulangan (l_d) dibuat bervariasi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Benda uji kuat lekat

No	Diameter tulangan, d_b (mm)	Panjang Penyaluran, l_d (mm)	Selimut beton, c (mm)	c/d_b	l_d/d_b
1	16,4	50	66,8	4,07	3,05
2	16,4	100	66,8	4,07	6,10
3	16,4	150	66,8	4,07	9,15
4	16,4	200	66,8	4,07	12,20
5	16,4	250	66,8	4,07	15,24
6	16,4	300	66,8	4,07	18,29

3.2 Pengujian Kuat Lekat



Gambar 2. Benda uji dan pengujian kuat lekat

Pengujian kuat lekat dilakukan dengan cara menempatkan silinder beton pada *loading frame* yang dilengkapi dengan *hydraulic jack* dan *load cells*, dan batang tulangan yang tertanam pada silinder ditarik sampai tercabut. Hasil pengujian berupa data beban maksimum. Untuk lebih jelasnya pengujian kuat lekat ini dapat dilihat pada Gambar 2.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan 6 buah silinder beton adalah seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Kuat tekan beton

Benda Uji	Gaya tekan (N)	Diameter (mm)	Kuat tekan (MPa)	Tegangan rata-rata (MPa)
I	480000	150	27,16	27,63
II	520000	150	29,43	
III	480000	150	27,16	
IV	400000	150	22,64	
V	570000	150	32,26	
VI	480000	150	27,16	

Dari Tabel 2. dapat dilihat bahwa kuat tekan beton rata-rata sebesar 27,63 MPa. Beton ini termasuk beton normal sebab kuat tekannya berada antara 15 – 40 MPa.

4.2 Kuat Tarik Baja

Hasil pengujian 3 buah benda uji tarik baja D16 adalah seperti pada Tabel 3.

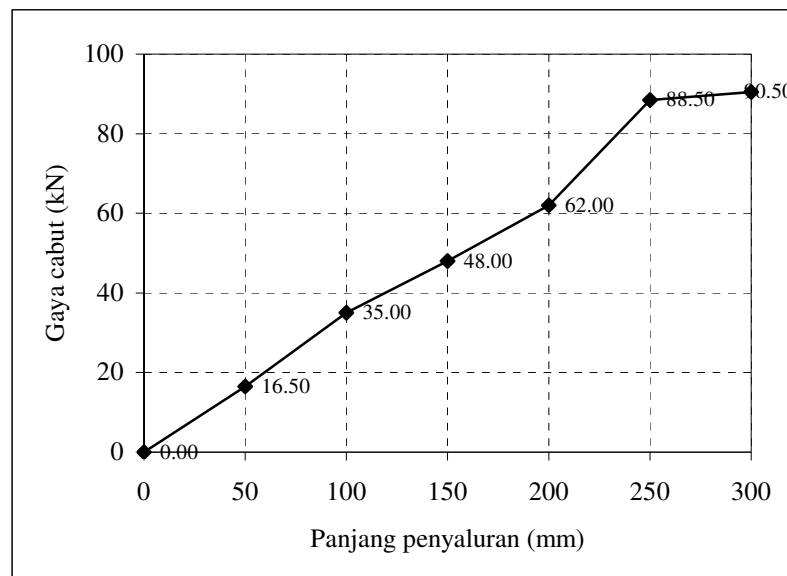
Tabel 3. Pengujian tarik baja

Benda Uji	Diameter pengujian (mm)	Gaya tarik (kN)	Tegangan luluh (MPa)	Tegangan luluh rata-rata (MPa)
I	11,82	53,5	487,56	483,66
II	11,86	53,0	479,75	

Dari Tabel 3. dapat dilihat bahwa tegangan luluh baja rata-rata sebesar 483,66 MPa.

4.3 Kuat Cabut

Hasil pengujian kuat cabut tulangan dengan berbagai variasi panjang penyaluran (l_d) seperti pada Tabel 4. dan Gambar 3. berikut ini. Dari Tabel 4. dan Gambar 3. dapat dilihat bahwa peningkatan panjang penyaluran dari 50, 100, 150, 200, 250, hingga 300 mm meningkatkan kemampuan benda uji untuk mendukung gaya cabut. Peningkatan kuat cabut untuk panjang penyaluran dari 50 mm sampai 200 mm hampir mendekati linear, dan kegagalan yang terjadi berupa tercabutnya tulangan dan silinder beton masih utuh. Pada panjang penyaluran 250 dan 300 mm peningkatan kuat cabut sudah tidak linear lagi karena pada kedua panjang penyaluran ini tulangan tercabut dan silinder beton terbelah. Untuk lebih jelasnya kegagalan yang terjadi pada benda uji dapat dilihat pada Gambar 4. dan 5.



Gambar 3. Perbandingan kuat cabut tulangan

Tabel 4. Pengujian kuat lekat tulangan

No.	Benda Uji	Panjang penyaluran, l_d (mm)	Gaya cabut, P (kN)	Gaya cabut rata-rata (kN)
1	A	50	14	16,50
2	B		19	
3	A	100	38	35,00
4	B		32	
5	A	150	51	48,00
6	B		45	
7	A	200	65	62,00
8	B		59	
9	A	250	93	88,50
10	B		84	
11	A	300	88	90,50
12	B		93	

**Gambar 4. Kegagalan panjang penjangkaran 50, 100, 150 mm, dan 200 mm (tulangan tercabut, beton utuh)****Gambar 5. Kegagalan panjang penjangkaran 250 dan 300 mm (tulangan tercabut, beton terbelah)**

Untuk mengetahui kondisi tulangan sudah luluh atau belum akibat beban cabut untuk masing-masing panjang penyaluran dapat dilihat dari Tabel 5.

Tabel 5. Tegangan yang terjadi pada tulangan berdasarkan gaya cabut

Panjang penyaluran, l_d (mm)	Gaya cabut (kN)	Diameter tulangan (mm)	Tegangan (MPa)	Keterangan
50	16,50	16,40	78,11	tulangan belum luluh
100	35,00	16,40	165,69	tulangan belum luluh
150	48,00	16,40	227,23	tulangan belum luluh
200	62,00	16,40	293,50	tulangan belum luluh
250	88,50	16,40	418,95	tulangan belum luluh
300	90,50	16,40	428,42	tulangan belum luluh

Berdasarkan Tabel 5. dapat disimpulkan bahwa baja tulangan pada pengujian cabut (*pull out test*) untuk setiap panjang penyaluran belum mencapai luluh karena tegangan yang terjadi masih di bawah tegangan luluh baja yang besarnya 483,66 MPa seperti pada Tabel 3.

Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03 panjang penyaluran dasar (l_{db}) berdasarkan Persamaan 1. didapat sebesar 475,92 mm, atau dalam segala hal panjang penyaluran (l_d) tidak boleh kurang dari 300 mm. Dari Tabel 5. dapat dilihat bahwa peningkatan panjang penyaluran dari 250 mm menjadi 300 mm tidak efektif karena tidak dapat untuk mengembangkan tegangan baja hingga mencapai tegangan luluh. Hal ini diakibatkan silinder beton pecah sehingga peningkatan tegangan yang terjadi pada tulangan hanya sedikit. Berdasarkan SNI 03-2847-2002, tebal selimut beton minimum untuk struktur yang tidak langsung berhubungan dengan cuaca atau tidak langsung berhubungan dengan tanah seperti balok dan kolom sebesar 40 mm. Selimut beton yang digunakan pada penelitian ini sebesar 66,8 mm, jadi sudah memenuhi persyaratan. Pecahnya penutup beton diakibatkan oleh beton di sekeliling tulangan mengalami tekan, sehingga walaupun selimut beton yang tersedia sudah memenuhi persyaratan tapi masih terjadi kegagalan. Kondisi ini berbeda dengan perilaku lekatan yang sebenarnya terjadi pada balok beton bertulang yang tulangan dan betonnya keduanya mengalami tarik.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Peningkatan panjang penyaluran dari 50, 100, 150, 200, 250, hingga 300 mm meningkatkan kemampuan benda uji untuk mendukung gaya cabut.
2. Kuat cabut meningkat dan berbanding lurus sampai panjang penyaluran tertentu.
3. Kegagalan pada uji cabut tulangan dapat berupa tulangan tercabut beton utuh atau tulangan tercabut beton terbelah.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian pengaruh panjang penyaluran dengan benda uji berupa balok sehingga sesuai dengan kondisi nyata.
2. Pengukuran deformasi sebaiknya dilakukan juga pada pengujian *pull out* sehingga didapat beban cabut pada saat tulangan telah bergeser minimum 2,5 mm seperti yang diatur pada SNI 03–4809–1998.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ahmed, K., Siddiqi, Z.A., dan Yousaf, M., 2007, *Slippage of Steel in High and Normal Strength Concrete*, Pak. J. Engg. & Appl. Sci., Vol. 1, Pakistan.
<http://www.uet.edu.pk/export/sites/UETWebPortal/research/researchinfo/journal/volume1/article5.pdf>
2. Alavi-Fard, M., dan Marzouk, H., 2004, *Bond of High Strength Concrete Under Monotonic Pull Out Loading*, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, St. John's, NF, Canada.
<http://www.engr.mun.ca/~hmarzouk/MCR%20Marzouk%20text.pdf>
3. Dipohusodo, I., 1994, *Struktur Beton Bertulang*, PT, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
4. Elagroudy, H., 2003, *Bond Characteristics Of Micro-Composite Multistructural Formable Steel Used In Reinforced Concrete Structures*, Master of Science Thesis, Civil Engineering, North Carolina State University, USA,
<http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-07252003-213630/unrestricted/etd.pdf>
5. Nawy, E.G., 1998, *Beton Bertulang suatu Pendekatan Dasar*, Cetakan II, PT Refika Aditama, Bandung.
6. SK SNI T-15-1991-03, 1991, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, Yayasan LPMB, Departemen Pekerjaan Umum RI.
7. SNI 03-2847-2002, *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, Puslitbang Permukiman, Departemen Pekerjaan Umum.
8. SNI 03-4809-1998, *Metode Pengujian Untuk Membandingkan Berbagai Beton Berdasarkan Kuat Lekat Yang Timbul Terhadap Tulangan*, Puslitbang Permukiman, Departemen Pekerjaan Umum.
9. Wang, C.K. dan Salmon, C.G., 1993, *Desain Beton Bertulang*, Edisi Ke-4, Jilid 1, Erlangga, Jakarta.

PEMANFAATAN OBYEK 4D PADA PERENCANAAN/ PELAKSANAAN PROYEK PENGADILAN NEGERI CIANJUR JAWA BARAT

Maksum Tanubrata

*Dosen Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Jl Prof Drg Suria Soemantri 65, Bandung
Email: maksum.tanubrata150@gmail.com*

ABSTRAK

Salah satu komponen dari perencanaan suatu proyek adalah penjadwalan setiap aktivitas yang akan dilaksanakan pada proyek tersebut. Penelitian yang berkembang pada saat ini berhasil mengembangkan suatu sistem yang dikenal dengan sistem perencanaan 4D yang mampu menggambarkan urutan-urutan proyek konstruksi. Sistem perencanaan 4D pada dasarnya adalah penggabungan antara gambar 3D dengan waktu sebagai dimensi keempat. Tujuan dari penulisan ini adalah melakukan simulasi urutan pelaksanaan proyek konstruksi sebelum Proyek tersebut dilaksanakan di lapangan. Jadi sebelum kontraktor melaksanakan pekerjaan tersebut, kontraktor dapat mengetahui hal-hal apa yang akan terjadi pada waktu proyek tersebut dilaksanakan yaitu dengan menggunakan simulasi dengan mempergunakan alat bantu berupa program dari vico software. Adapun proyek yang ditinjau adalah proyek Pengadilan Negeri Cianjur Jawa Barat. Adapun metode yang digunakan adalah merupakan penggabungan antara jadwal dan 3D model menggunakan program *Microsoft Project* dan program dari *Vico Software* seperti *Constructor*, *Control*, *Estimator*, dan *5D Presenter* sebagai media untuk menampilkan simulasi. Adapun simulasi ini mempunyai kelemahan yaitu jika nanti proyek tersebut akan dilaksanakan pengadaan barang-barang yang dibutuhkan pada proyek ini tidak boleh terlambat. Dari penelitian ini dapat dilihat proses pelaksanaan urutan pekerjaan berdasarkan rencana kerja yang dibuat. Simulasi 4D memberikan gambaran terhadap metode pengerjaan yang akan digunakan, dan juga dapat dilakukan evaluasi terhadap jadwal proyek apabila terjadi konflik antar jenis pekerjaan.

Kata kunci : 3D model, 4D model, penjadwalan, simulasi, *microsoft project*.

1. PENDAHULUAN

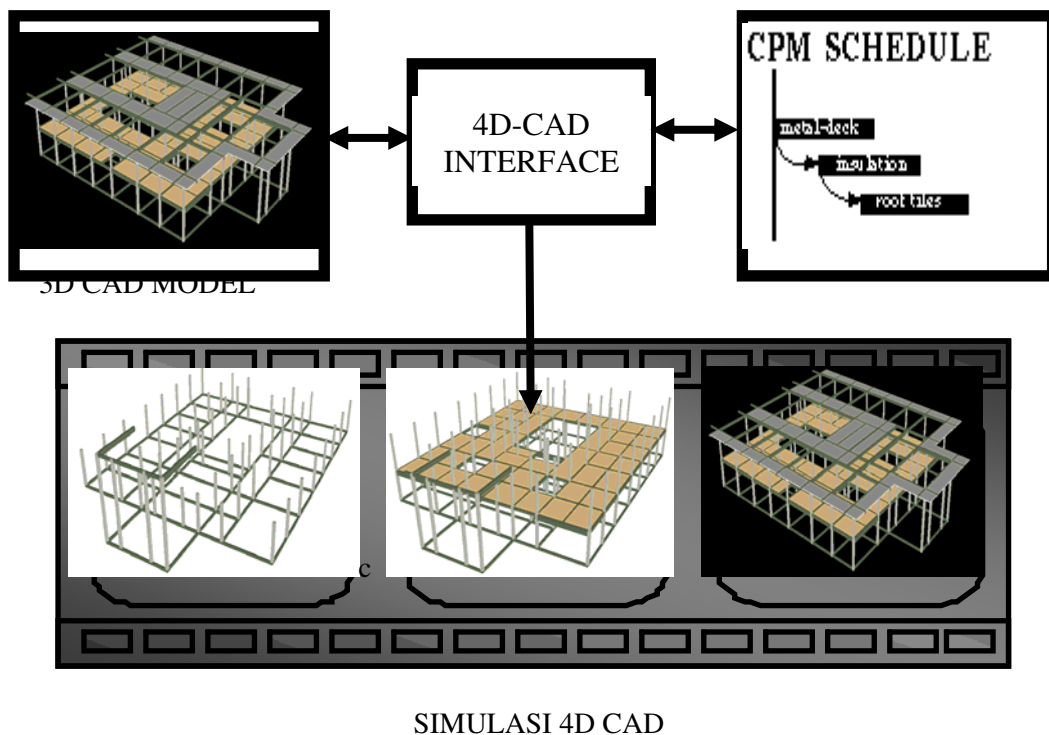
Teknik yang digunakan untuk mengelola suatu desain konstruksi, perencanaan dan proses-proses konstruksi dari suatu fasilitas pada perangkat lunak merupakan abstrak dari proses-proses konstruksi dan mengurangi permasalahan yang sangat kompleks pada saat proses pelaksanaan konstruksi kedalam sebuah *Gantt chart* atau *CPM schedule*. Permasalahan yang terkadang timbul adalah mentransformasikan gambar dua dimensi secara nyata, baik ukuran dari bangunan dan urutan-urutan detail penggambaran. Dengan semakin bertambahnya permasalahan yang dihadapi oleh dunia konstruksi pada saat ini, maka dibutuhkan suatu sistem perencanaan proyek yang lebih baik. Terutama dengan semakin kompleksnya proyek konstruksi serta semakin terbatasnya sumber daya yang tersedia, memaksa perencana proyek untuk merencanakan pelaksanaan konstruksi seefisien mungkin. Semakin terperinci perencanaan yang dilakukan, maka semakin kecil kesalahan yang mungkin terjadi di lapangan. Tulisan ini menunjukkan upaya terbaik

dalam mengkomunikasikan kemajuan pekerjaan di lapangan berdasarkan waktu yang telah direncanakan dengan gambar proyek yang akan dilaksanakan.

Para perencana/ kontraktor proyek umumnya menggunakan metode penjadwalan jaringan untuk memvisualisasikan bagaimana jadwal konstruksi dilaksanakan. Sistem penjadwalan tersebut saat ini telah banyak membantu para perencana proyek untuk mengkoordinasikan pelaksanaan kegiatan konstruksi tersebut kepada pihak-pihak yang terlibat. Namun, sistem penjadwalan tersebut masih belum memberikan gambaran secara menyeluruh mengenai bentuk komponen proyek serta tingkat kerumitan komponen proyek yang akan dibuat. Dengan demikian untuk mengidentifikasi bentuk komponen proyek yang berhubungan dengan suatu kegiatan konstruksi, maka perencana proyek harus melihat pada gambar dua dimensi dan mengasosiasikan komponen proyek tersebut dengan representasinya pada sistem penjadwalan proyek. Karena sistem penjadwalan tersebut masih merupakan representasi abstrak dari suatu kegiatan dengan jadwalnya pada suatu proyek, para perencana masih harus menginterpretasikan aktivitas yang bersangkutan untuk memahami urutan-urutan kegiatan konstruksi. Sangat dibutuhkan suatu alat yang lebih komprehensif untuk memungkinkan arsitek, *engineers*, dan kontraktor mensimulasikan dan memvisualisasikan urutan konstruksi sebagai bagian interaksi dengan proyek tersebut sebelum dilaksanakan. Salah satu komponen dari perencanaan suatu proyek adalah penjadwalan setiap aktivitas yang akan dilaksanakan pada proyek tersebut. Perencanaan proyek pada umumnya menggunakan metoda penjadwalan diagram batang untuk menjelaskan bagaimana jadwal konstruksi dilaksanakan.

Akan tetapi, metoda penjadwalan tersebut belum memberikan gambaran secara menyeluruh terhadap bentuk komponen proyek (aspek ruang) serta tingkat kerumitan komponen proyek yang akan dibuat. Dengan demikian untuk memberikan gambaran kegiatan proses konstruksi, perencana proyek harus melihat pada gambar dua dimensi dan mengasosiasikan komponen proyek tersebut dengan representasinya pada sistem penjadwalan proyek. Namun, sistem penjadwalan seperti ini belum memberikan gambaran yang jelas untuk memahami urutan-urutan kegiatan konstruksi.

Penelitian yang berkembang pada saat ini berhasil mengembangkan suatu sistem yang dikenal dengan sistem perencanaan 4D yang mampu menggambarkan urutan-urutan proyek konstruksi. Sistem perencanaan 4D pada dasarnya adalah penggabungan antara gambar 3D dengan waktu sebagai dimensi keempat, sehingga aspek ruang dan aspek waktu digabungkan menjadi satu sebagaimana yang terjadi pada proyek konstruksi.



Gambar 1. Komponen Simulasi 4D CAD

Simulasi 4D CAD mendukung proses *capturing* dan mengatur secara dinamis interaksi antara komponen-komponen proyek dan sumber daya dari waktu ke waktu dan mendukung interaksi pengguna setiap waktu dengan 4D CAD *model*. Simulasi ini pun membantu dalam komunikasi mengenai proyek yang akan dilaksanakan, persetujuan dan perbaikan dari jadwal konstruksi oleh berbagai pihak, seperti para manajer konstruksi, klien-klien, para perancang, subkontraktor dan pihak-pihak yang berkepentingan.

2.TUJUAN PENELITIAN

Berangkat dari permasalahan diatas, tujuan penulisan ini adalah melakukan simulasi pelaksanaan menggunakan sistem 4D CAD sebelum pelaksanaan proyek konstruksi tersebut dilaksanakan.

3. KONTRIBUSI SIMULASI 4D CAD

Menggambarkan hubungan antara waktu dan ruang merupakan suatu mekanisme yang sangat kuat untuk memvisualisasikan dan mengkomunikasikan tujuan desain. Dengan melakukan simulasi 4D CAD ini, pihak-pihak yang berkepentingan dalam proyek dapat mengidentifikasi permasalahan yang timbul dalam proses desain konstruksi, seperti:

1. Mengidentifikasi permasalahan yang mungkin timbul sebelum proyek tersebut diimplementasikan dengan memperlihatkan konflik antara waktu dan ruang serta masalah aksesibilitas.
2. Memberikan informasi dalam perencanaan konstruksi, bentuk gambar 2 dimensi tidak menyediakan informasi secara spesifik mengenai urutan dari aktivitas dan jadwal pengerjaan untuk tiap elemen desain.
3. Memperlihatkan metoda konstruksi yang akan dipakai di lapangan dengan memvisualisasikan secara lebih mendetail tiap tahap proses konstruksi yang akan digunakan.
4. Memperlihatkan alternatif proses konstruksi yang dapat dilaksanakan sehingga para perencana proyek dapat memperkirakan konsekuensi.

4. RUANG LINGKUP PEMBAHASAN

Materi yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah mengenai simulasi penjadwalan pengerjaan struktur beton yang meliputi sloof, balok, kolom, pelat, ring balok, dan dak beton pada Pengadilan Negeri Kabupaten Cianjur menggunakan sistem 4D. Dalam simulasi ini waktu kedatangan material diasumsikan tidak terjadi keterlambatan dengan kata lain material yang digunakan selalu tersedia di lapangan. Simulasi dalam penelitian ini menghubungkan teknologi virtual dengan suatu sistem penjadwalan dengan menggunakan *software* komersial yang telah ada.

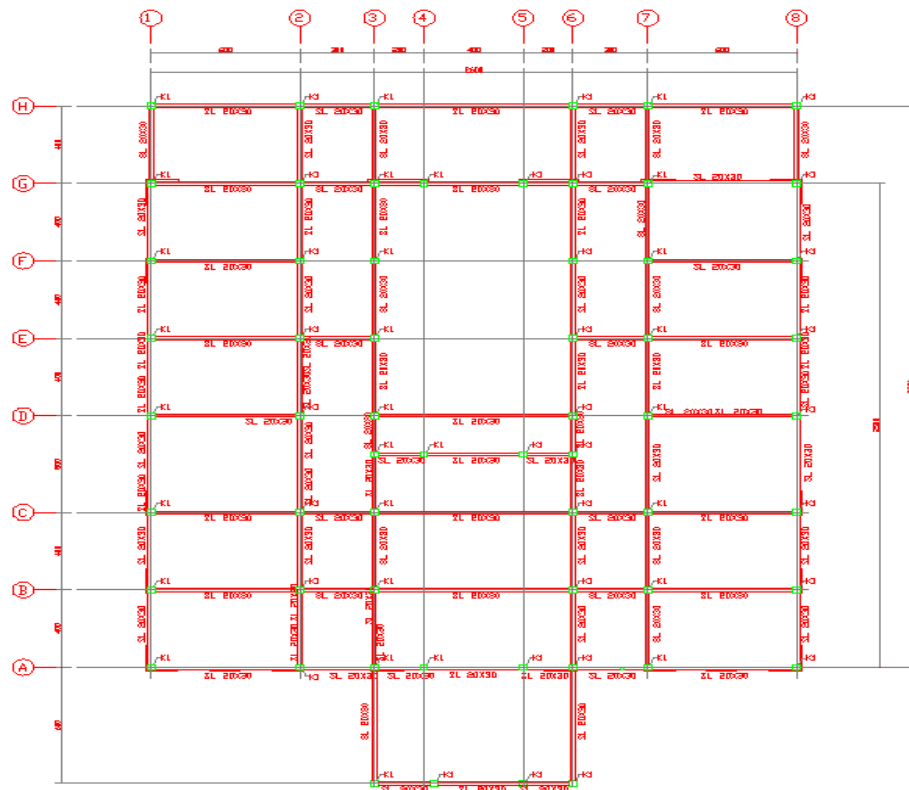
5. PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini dilakukan simulasi sebelum pelaksanaan pekerjaan di lapangan di mulai. Pemodelan struktur yang diteliti adalah Pengadilan Negeri Cianjur. Penelitian ini mencoba melakukan simulasi pelaksanaan menggunakan sistem 4D yang dapat memvisualisasikan suatu alur gerakan obyek 3D sesuai dengan urutan penjadwalan yang telah direncanakan sebelumnya. Dimana simulasi pelaksanaan ini terdiri dari sloof, balok, kolom, lantai, dak beton, dan ring balok. Simulasi ini dilakukan dengan data-data yang telah diketahui:

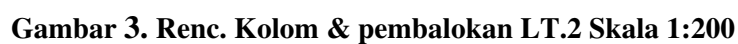
1. Denah rencana sloof dan kolom lantai
2. Denah rencana kolom dan pembalokan lantai
3. Denah rencana balok atap
4. Luas bangunan = 1508 m²
5. Lokasi = Jalan Raya Bandung – Cianjur KM 5, Cianjur

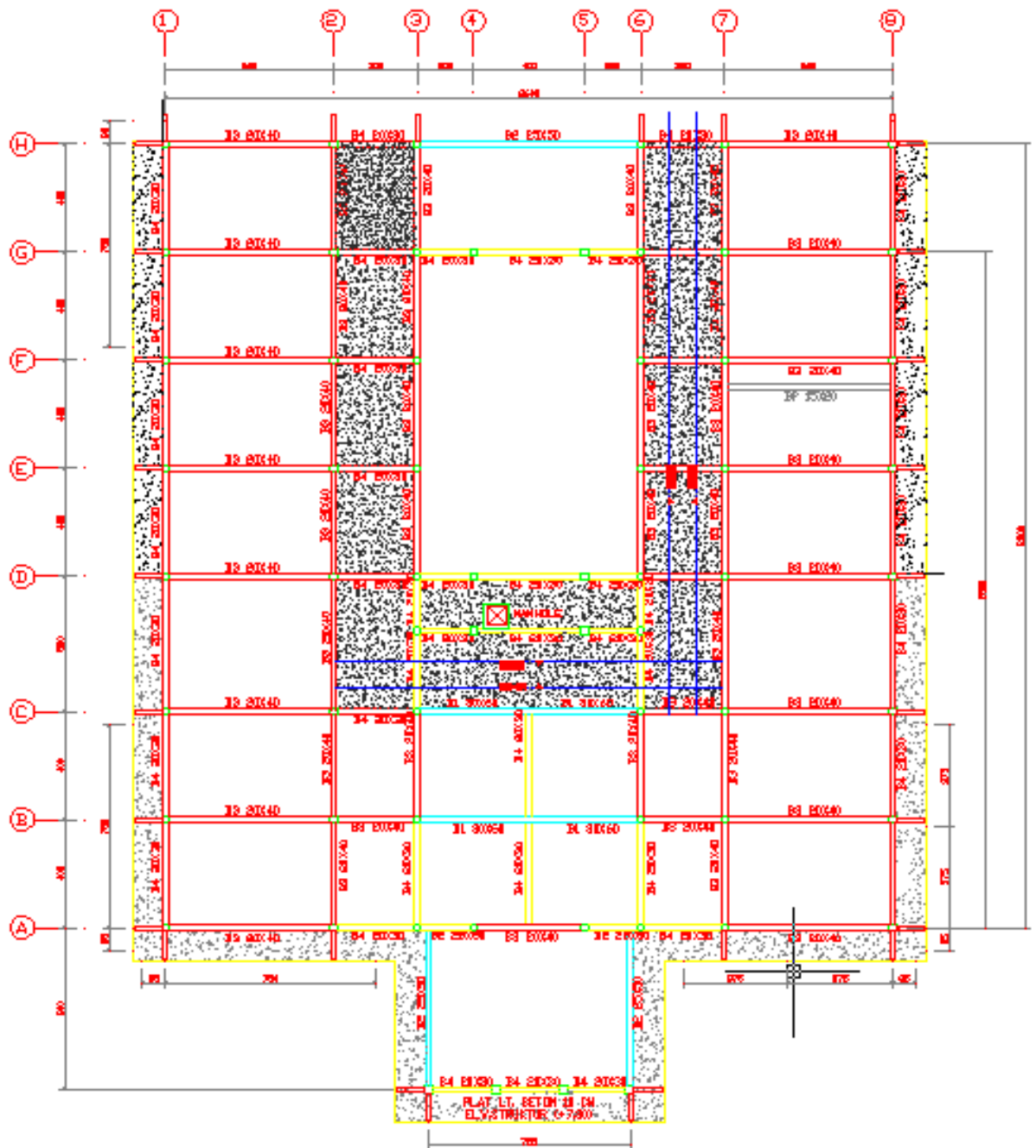
Pengerjaan proyek Pengadilan Negeri Cianjur ini dapat dibagi dalam beberapa bagian:

1. Pekerjaan sloof
2. Pekerjaan kolom lantai dasar
3. Pekerjaan balok lantai dasar
4. Pekerjaan pelat lantai satu
5. Pekerjaan kolom lantai satu
6. Pekerjaan ring balok
7. Pekerjaan dak beton



Gambar 2. Renc. Sloof & kolom LT.1 Skala 1:200





RENC. RING BALOK ATAP

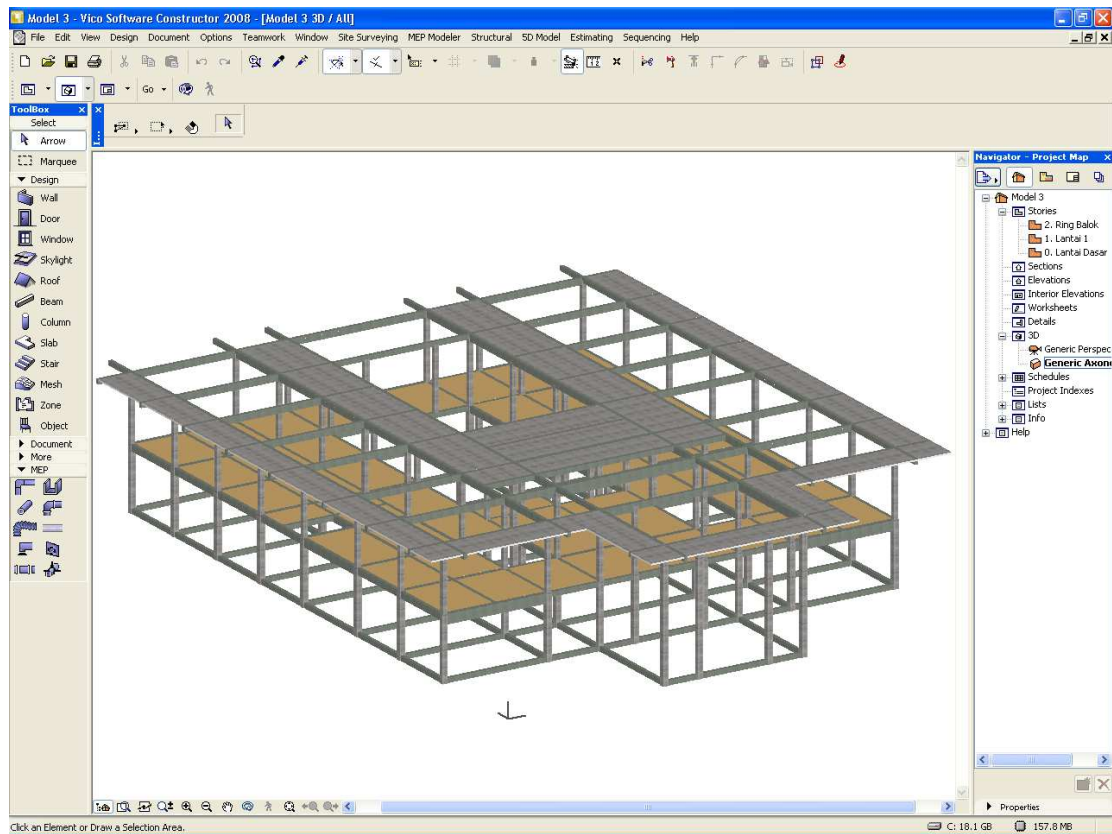
SKALA 1:200



Gambar 4. Renc. Ring Balok Atap Skala 1:200

Proses simulasi 4D dimulai dengan pembuatan tiga dimensi dari elemen struktur bangunan tersebut pada program Constructor 2008 yang mengadopsi teknologi yang dimiliki oleh program ArchiCAD 11. Setiap obyek dalam proyek tersebut dimodelkan

dalam bentuk tiga dimensi serta di beri tekstur pada permukaannya sehingga elemen nampak layaknya elemen struktur beton yang ada dilapangan. Seluruh obyek tersebut disimpan dalam format Constructor 2008 Solo Project (*.pln).



Gambar 4. Pembuatan 3D Model Pada Constructor 2008

Pembuatan 3D model dilakukan menggunakan Constructor 2008 solo Project (*.pln) agar seluruh elemen-elemen proyek yang meliputi sloof, kolom, balok, dan pelat dapat di deteksi oleh program Estimator 2008 yang nantinya disimpan dalam suatu *database* yang isi memuat seluruh elemen-elemen proyek tersebut.

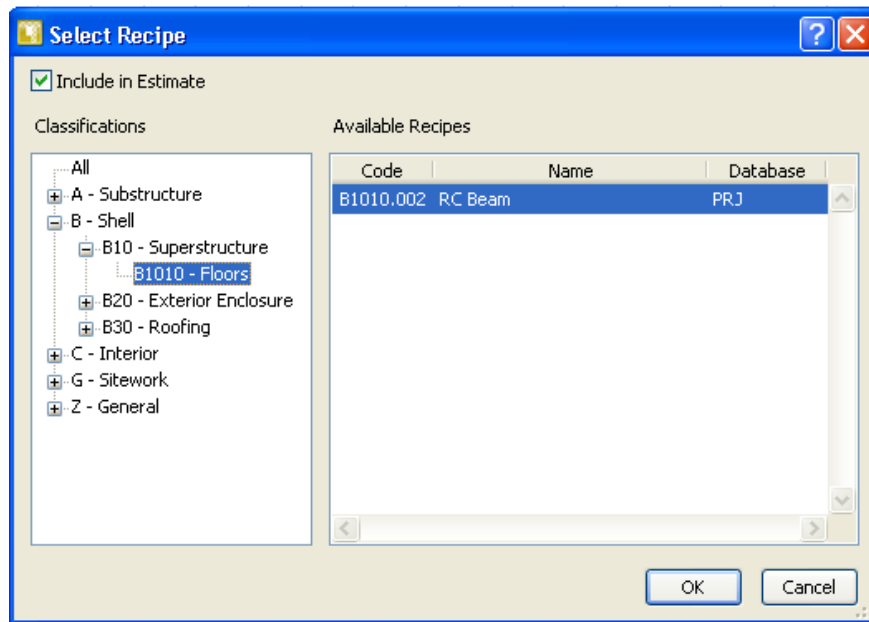
Gambar 5. Contoh Pembuatan *Database* Pada Elemen Balok

Setelah mendefinisikan seluruh elemen proyek yang ada, langkah selanjutnya adalah dengan memasukkan metoda pengerjaan pada elemen tersebut. Sebagai contoh diambil metoda pengerjaan pengecoran pada balok.

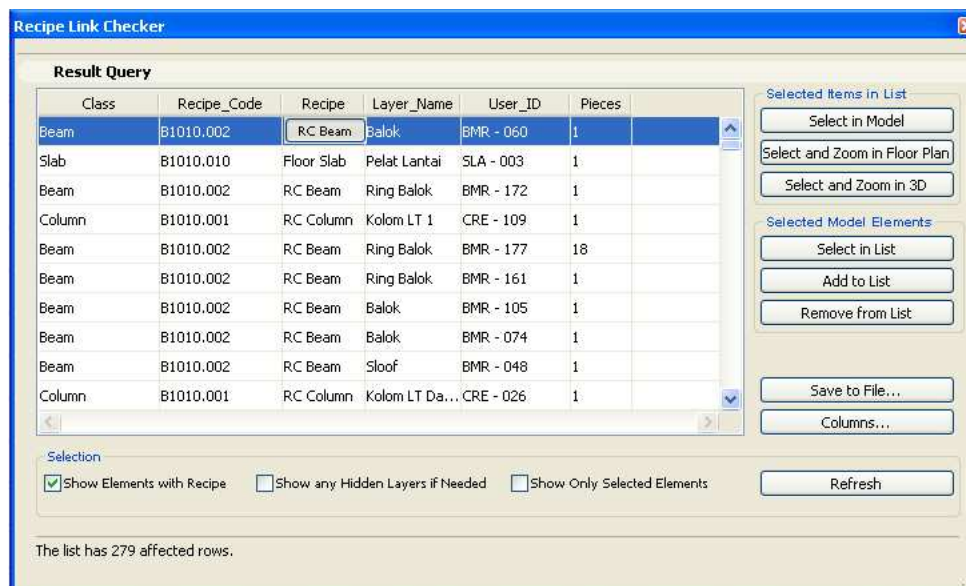
Location	Costs	Resources (*)	Memo		
Cost type	€/Unit	€	Cost type	€/Unit	€
1 Labor:	12.00	550.92			
2 Material:	66.14	3036.49			
3 Subcontract:	0.00	0.00			
4 Equipment:	0.00	0.00			
5 Other:	0.00	0.00			
In total:		78.14 €/Unit			
		3587.41 €			

Gambar 6. Contoh Pembuatan Metoda Pengecoran Pada Elemen Balok

Obyek tiga dimensi yang telah dibuat menggunakan Constructor 2008 meng-*import database* yang telah dibuat menggunakan Estimator 2008, agar seluruh obyek 3D model tersebut dapat mendeteksi segala jenis pekerjaan pada seluruh elemen-elemen proyek yang ada pada gambar 3D tersebut.

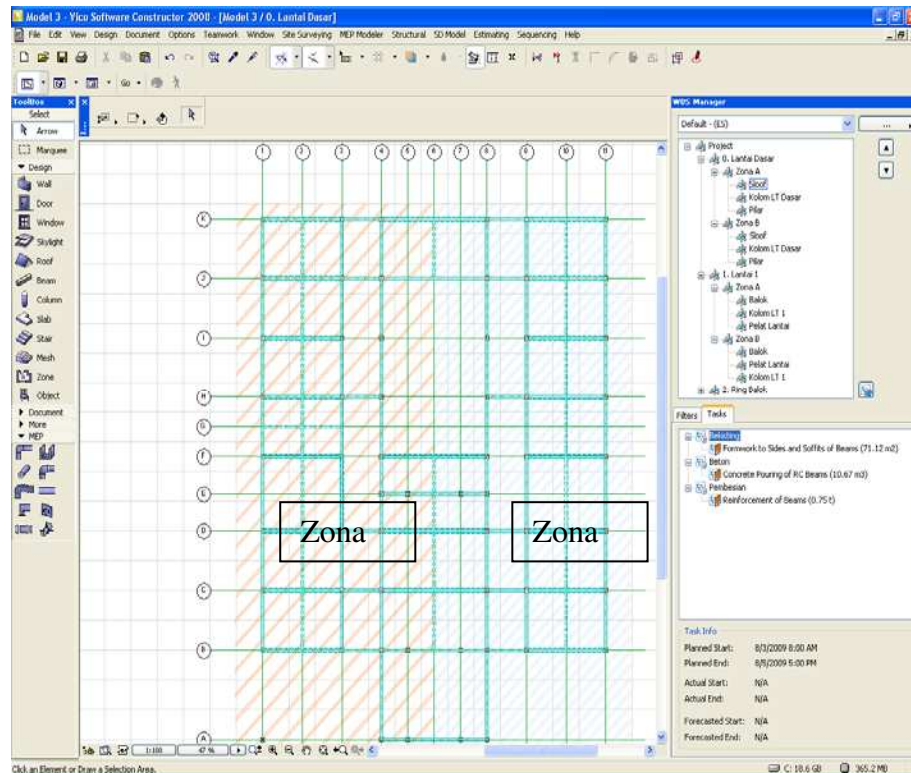


**Gambar 7. Proses *Import Database* Dari Estimator 2008
Menggunakan Constructor 2008**



Gambar 8. Hasil *Import Seluruh Database* Untuk seluruh Elemen Proyek

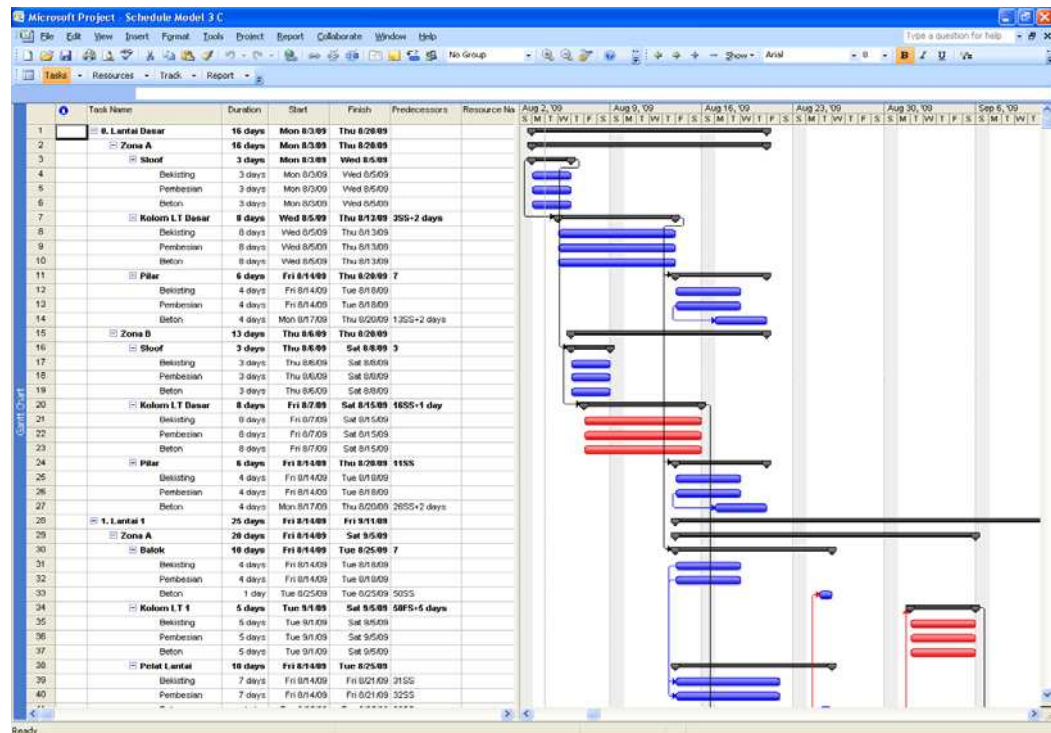
Kemudian tahap selanjutnya adalah melakukan perencanaan penjadwalan dari setiap kegiatan proyek tersebut dibuat terlebih dahulu menggunakan fasilitas *work break down structure manager (WBS Manager)*. Dan dilanjutkan ke tahap pembuatan alur gerakan simulasi ini, gambar 3D model dibagi menjadi dua bagian yaitu zona a dan zona b. Seperti yang nampak pada gambar di bawah ini.



Gambar 9. Pembuatan Alur Pergerakan Simulasi 4D

Setelah menyusun *item-item* pekerjaan dengan menggunakan fitur WBS Manager, kemudian *item-item* pekerjaan tersebut dapat di-ekspor ke Microsoft Project untuk dilakukan proses penjadwalan pada setiap *item-item* pekerjaan yang telah di buat pada WBS Manager.

Kemudian tahap selanjutnya adalah melakukan perencanaan penjadwalan dari setiap kegiatan proyek tersebut dibuat pada program Microsoft Project. Microsoft Project merupakan salah satu program penjadwalan yang paling sering digunakan. Program Microsoft Project melakukan analisa penjadwalan dengan menggunakan penjadwalan jaringan dengan kemampuan untuk merepresentasikan berbagai hubungan kegiatan seperti hubungan *start to start*, *start to finish*, *finish to start*, dan *finish to finish*.



Gambar 10. Perencanaan Penjadwalan Pada Program Microsoft Project

Ketepatan atau akurasi perkiraan kurun waktu banyak tergantung dari siapa yang membuat perkiraan tersebut. Yang dimaksud dengan kurun waktu kegiatan dalam metode jaringan kerja adalah lama waktu yang diperlukan untuk melakukan kegiatan dari awal hingga akhir. Kurun waktu ini lazimnya dinyatakan dalam jam, hari, atau minggu. Faktor-faktor di bawah ini perlu diperhatikan dalam memperkirakan kurun waktu kegiatan.

- a. Angka perkiraan hendaknya bebas dari pertimbangan pengaruh kurun waktu kegiatan yang mendahului atau yang terjadi sesudahnya. Misalnya, kegiatan memasang sloof harus tergantung dari tersedianya semen, tetapi dalam memperkirakan kurun waktu memasang sloof jangan dimasukkan faktor kemungkinan terlambatnya penyediaan semen.
- b. Angka perkiraan kurun waktu kegiatan dihasilkan dari asumsi bahwa sumber daya tersedia dalam jumlah yang normal.
- c. Pada tahap awal analisis, angka perkiraan ini dianggap tidak ada keterbatasan jumlah sumber daya, sehingga memungkinkan kegiatan dilaksanakan dalam waktu yang bersamaan atau paralel. Sehingga penyelesaian proyek lebih cepat dibanding bila dilaksanakan secara berurutan atau berseri.

- d. Gunakan hari kerja normal, jangan dipakai asumsi kerja lembur, kecuali kalau hal tersebut telah direncanakan khusus untuk proyek yang bersangkutan, sehingga diklasifikasi sebagai hal yang normal.
- e. Bebas dari pertimbangan mencapai target jadwal penyelesaian proyek, karena dikhawatirkan mendorong untuk menentukan angka yang disesuaikan dengan target tersebut. Tidak memasukkan angka kontijensi untuk hal-hal seperti adanya bencana alam (gempa bumi, banjir, badai, dan lain-lain), pemogokan, dan kebakaran.

Pengaruh volume dari tiap-tiap elemen proyek konstruksi juga merupakan pertimbangan yang penting untuk menentukan total waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan suatu proyek. Proses Penghitungan volume dan luas permukaan elemen proyek yang harus dipasang bekisting dapat dengan cepat diketahui dengan menggunakan fitur *show quantities of selected element*. Dari perhitungan program Constructor 2008 didapatkan volume tiap-tiap elemen yaitu.

- a. Sloof, Volume = $21,43 \text{ M}^3$, Bekisting = $284,48 \text{ M}^2$
- b. Kolom LT Dasar, Volume = $22,36 \text{ M}^3$, Bekisting = $298,18 \text{ M}^2$
- c. Balok, Volume = $45,91 \text{ M}^3$, Bekisting = $476,17 \text{ M}^2$
- d. Pelat Lantai, Volume = $54,6 \text{ M}^3$, Bekisting = $54,60 \text{ M}^2$
- e. Kolom LT 1, Volume = $11,44 \text{ M}^3$, Bekisting = $227,20 \text{ M}^2$
- f. Ring Balok, Volume = $34,67 \text{ M}^3$, Bekisting = $430,46 \text{ M}^2$
- g. Dak Beton, Volume = $40,63 \text{ M}^3$, Bekisting = $406,27 \text{ M}^2$

Names	Values	Unit	Descriptions
Bottom_Area	74.77	m2	Bottom area.
Count	26		Number of elements.
Formwork_Surface_Area	304.70	m2	Sum of gross surface areas that affect formwork.
Height	8.20	m	Height of the element.
Hole_Count	0		Number of holes in the element.
Hole_Edge_Net_Surface_Area	0.00	m2	Net surface area at the edges of the holes in the element.
Hole_Net_Surface_Area	0.00	m2	Net surface area of the holes in the element.
Length	395.15	m	Length of the element.
Net_Hole_Volume	0.00	m3	Net volume of the holes in the element.
Net_Volume	23.05	m3	Net volume of the element. Value excludes element volume.
Opp_Ref_Side_Length	395.75	m	Length of the element on the opposite side of the reference side.
Opp_Ref_Side_Net_Surface_Area	114.68	m2	Net surface area of the element on the opposite side of the reference side.
Perimeter	26.90	m	Perimeter of element.
Ref_Side_Length	394.55	m	Length of the element on the reference side of the element.
Ref_Side_Net_Surface_Area	114.68	m2	Net surface area of the element on the reference side of the element.
Section_Area	1.67	m2	Area of the section of the element.
Sum_Ends_Net_Surface_Area	0.57	m2	Sum of the net surface areas on both ends of the element.
Top_Net_Surface_Area	74.77	m2	Net surface area of the top of the element. Sub
Total_Net_Surface_Area	378.89	m2	Sum of all surface areas of the element: top, bottom, and side.
Weight	0.00	kg	Weight of the element. Calculated by multiplying volume by density.
Width	5.25	m	Width of the element.

Gambar 11. Fitur Perhitungan Volume Pada Constructor 2008

Dengan memasukkan unsur kurun waktu ke analisis jaringan kerja, berarti perencanaan telah memasuki taraf yang lebih khusus/spesifik, yaitu membuat jadwal kegiatan proyek. Visualisasi yang dapat dilakukan tidak hanya terbatas pada penjadwalan, durasi serta hubungan antar kegiatan dapat diubah-ubah sesuai keinginan pengguna. Sedangkan hari dimulainya kegiatan maupun hari selesainya kegiatan akan dikalkulasi secara otomatis oleh program Microsoft Project. Durasi yang digunakan pada simulasi ini, menggunakan tujuh hari kerja tanpa adanya hari libur, pekerjaan dalam satu hari dimulai dari pukul 08.00–12.00 istirahat pukul 12.00-13.00 dan kembali lagi bekerja pada pukul 13.00-17.00. Pada studi kasus ini, penjadwalan dari setiap elemen struktur bangunan tersebut dilakukan berdasarkan Tabel 3.1 berikut ini.

Setelah perencanaan penjadwalan dari proyek konstruksi tersebut dilakukan, data-data penjadwalan di-import dengan menggunakan fitur Pada Constructor 2008. Untuk melihat visualisasi dari penjadwalan tersebut, pengguna harus menyimpan file ini terlebih dahulu gambar 3D model yang telah digabungkan dengan penjadwalan yang telah dibuat ke dalam format 5D Presenter. Secara garis besar simulasi proses konstruksi pada 5D Presenter melakukan proses visualisasi urutan proses kegiatan konstruksi seperti yang telah dijadwalkan sebelumnya.

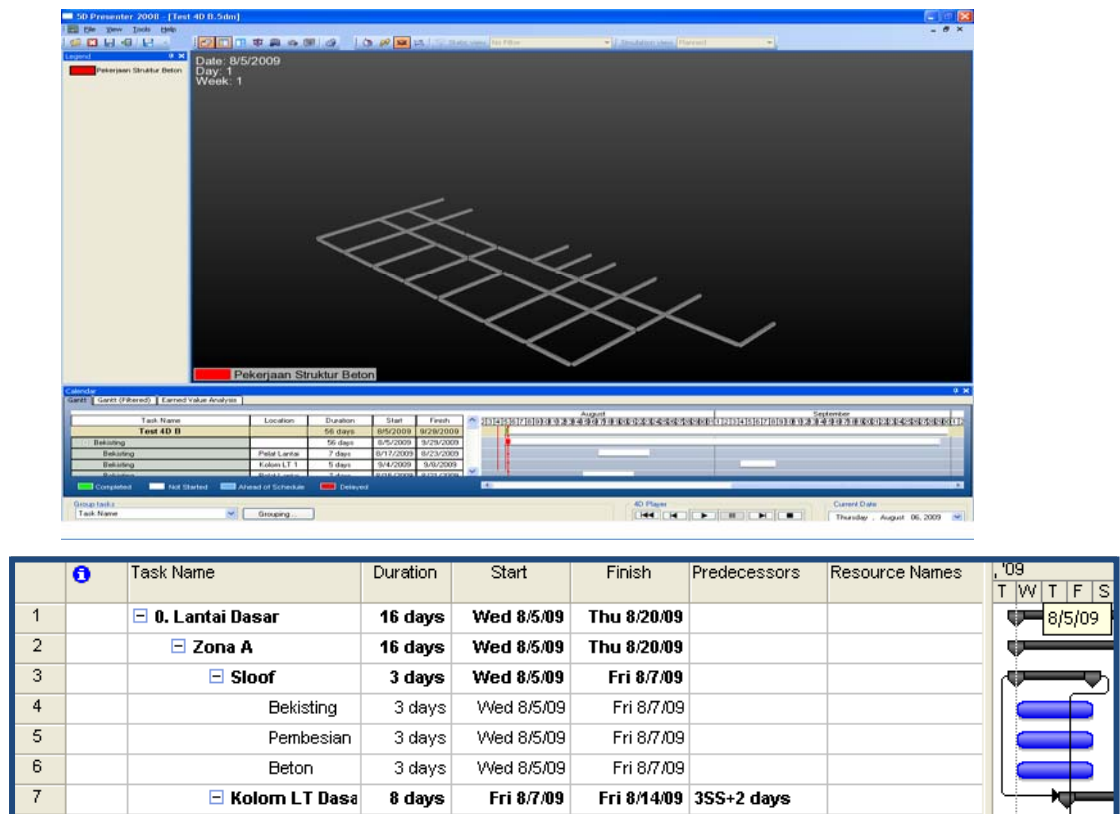
Pada saat program simulasi dijalankan. Pengguna dapat melihat urutan proses konstruksi mulai dari hari pertama hingga hari terakhir sesuai dengan penjadwalan yang telah dilakukan. Pengguna dapat melihat langsung visualisasi alur dari setiap elemen bangunan secara tiga dimensi serta urutan alur kegiatan tersebut yang mencerminkan hubungan antar kegiatan. Secara tidak langsung hubungan antar kegiatan yang bersifat *start to start* (suatu pekerjaan harus dimulai bersamaan waktunya dengan pekerjaan lain), *finish to start* (suatu pekerjaan baru boleh dimulai jika pekerjaan pendahulunya telah selesai), *start to finish* (suatu pekerjaan baru boleh diakhiri jika pekerjaan lain dimulai), *finish to finish* (suatu pekerjaan harus selesai bersamaan dengan selesainya pekerjaan yang lainnya).

Pengguna dapat memberhentikan simulasi tersebut pada setiap saat untuk melihat keadaan yang terjadi pada hari tersebut. Pengguna dapat melihat obyek tiga dimensi tersebut dari berbagai arah sesuai keinginan pengguna dan pengguna dapat melihat secara langsung perkembangan proyek dengan cara memilih tanggal sepanjang durasi proyek berlangsung sesuai keinginan pengguna. Dengan kemampuan ini, pengguna memiliki

kebebasan untuk bergerak kemana saja dan melihat dalam berbagai arah, yang sangat dibutuhkan untuk melihat secara lebih rinci setiap proses konstruksi dari setiap elemen bangunan. Dengan demikian pengguna dapat menganalisa proses konstruksi yang digunakan serta memprediksi kekurangan maupun kesalahan yang mungkin terjadi.

6.IMPLEMENTASI 4D CAD

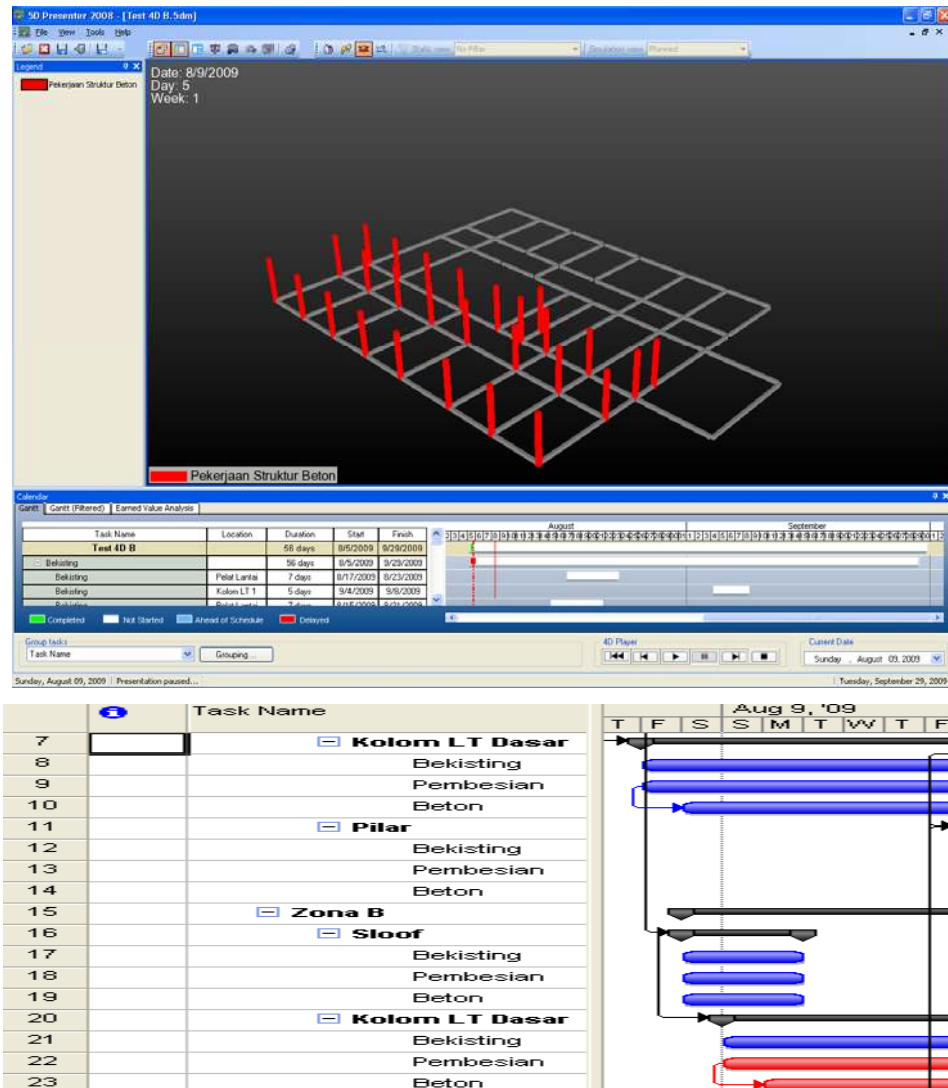
Melalui sistem perencanaan 4D CAD, perencana dapat dengan jelas melihat apa yang terjadi, dimana dan kapan pekerjaan itu di lakukan. Sehingga perencana dimungkinkan untuk menganalisa setiap kegiatan sebelum pelaksanaan kegiatan konstruksi di mulai, dan bahkan dapat juga menganalisa resiko-resiko yang akan terjadi apabila proyek sedang berlangsung.



Gambar 12 . Hasil Simulasi Pada Tanggal 5 Agustus 2009

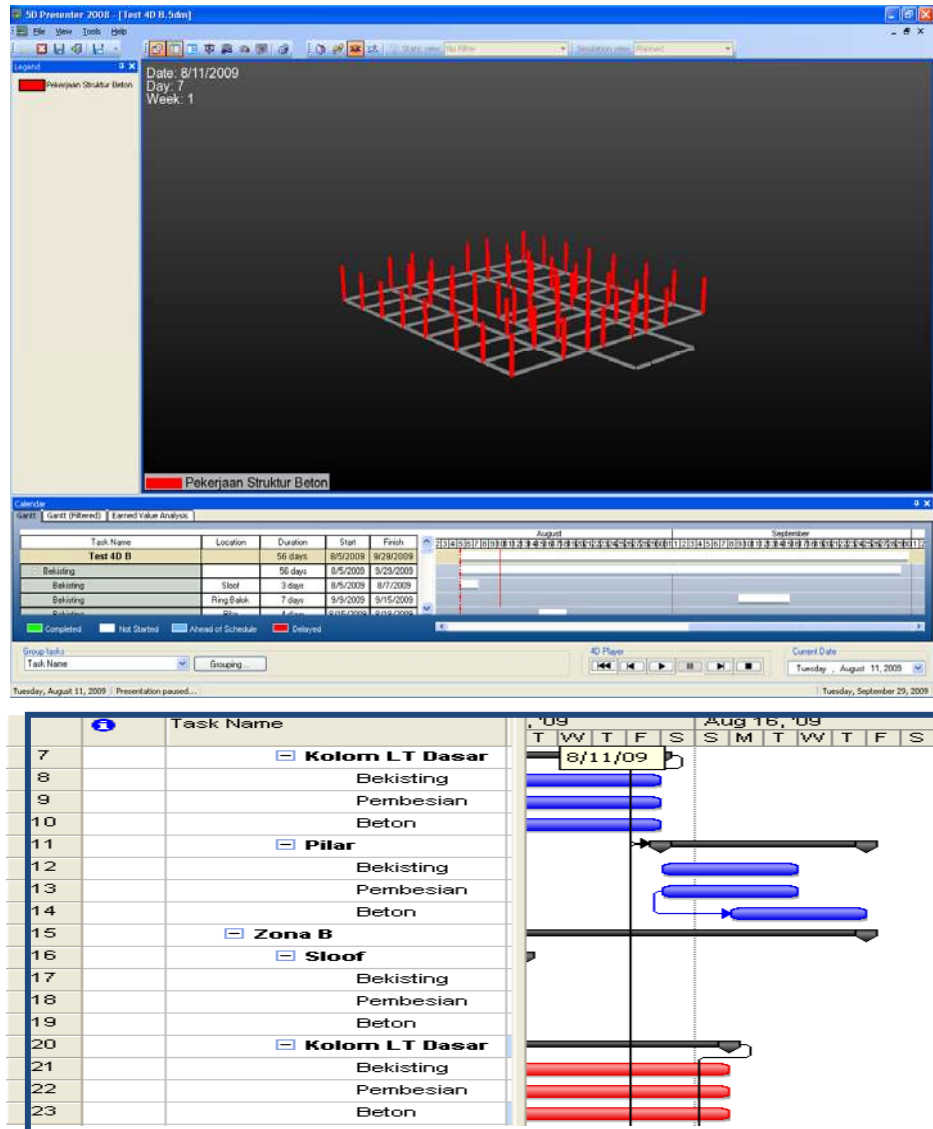
Dari hasil simulasi pada Gambar 12, dapat dilihat bahwa aktivitas pekerjaan pada tanggal 5 Agustus 2009 pada proyek adalah pekerjaan pembuatan sloof pada zona A. Pada Gambar 12 diperlihatkan juga hasil penjadwalan yang dilakukan menggunakan Microsoft Project agar memberikan gambaran yang lebih jelas lagi keterkaitan antara alur

pergerakan gambar dengan penjadwalan yang dilakukan sebelumnya menggunakan Microsoft Project.



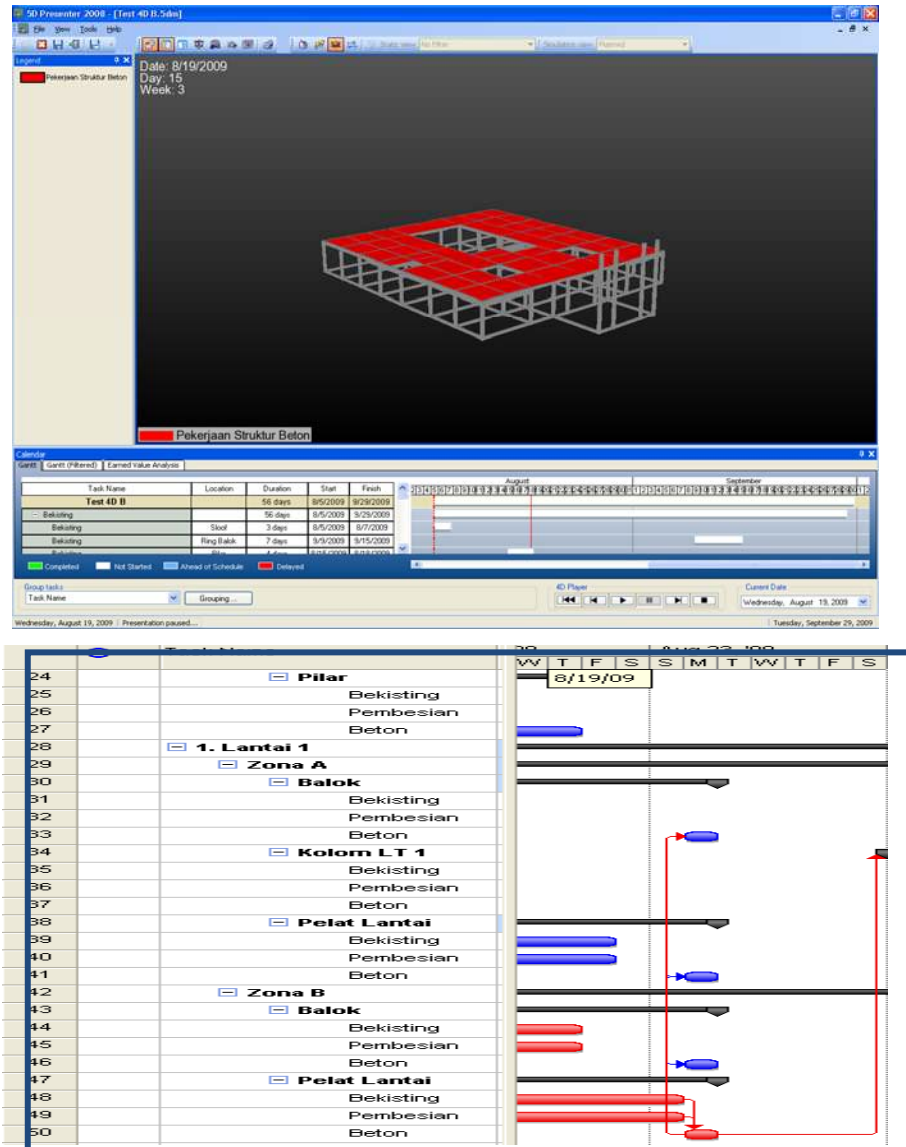
Gambar 13. Hasil Simulasi Pada Tanggal 9 Agustus 2009

Pada Gambar 13 pengguna dapat melihat bahwa pekerjaan kolom di zona A pada lantai dasar sedang dilaksanakan bersamaan dengan pengerjaan sloof pada zona B dan pengerjaan kolom lantai dasar pada zona B dalam masa pembuatan bekisting serta pengerjaan pembesian untuk kolom tersebut, namun pengerjaan pengecoran belum kolom pada zona B belum dimulai. Pekerjaan pembesian dan pengecoran pada elemen kolom lantai dasar di zona B termasuk kegiatan kritis, sehingga diusahakan tidak terjadi keterlambatan penyelesaian pekerjaannya.



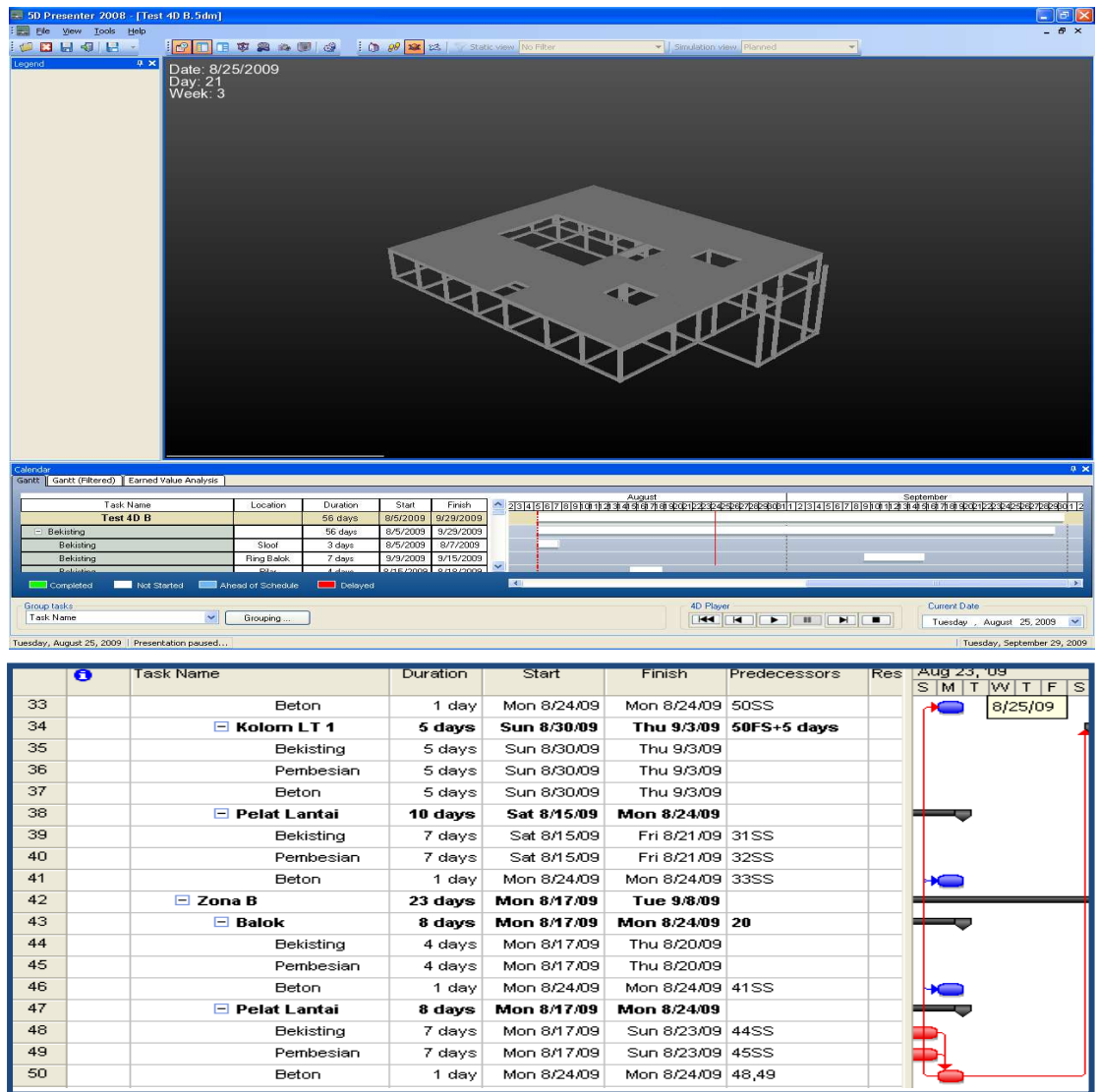
Gambar 14. Hasil Simulasi Pada Tanggal 11 Agustus 2009

Pada Gambar 14 pengguna dapat melihat pekerjaan proyek pada tanggal 11 Agustus 2009 pekerjaan kolom pada lantai dasar di zona A dan zona B dilakukan secara paralel. Pekerjaan yang dilakukan secara paralel dapat lebih cepat terselesaikan dibanding dengan pekerjaan yang dilakukan secara berurutan. Perkerjaan kolom lantai dasar pada zona A dan zona B dilakukan secara paralel dikarenakan juga bahwa kolom lantai dasar pada zona B termasuk kegiatan kritis yang tidak boleh mengalami keterlambatan.



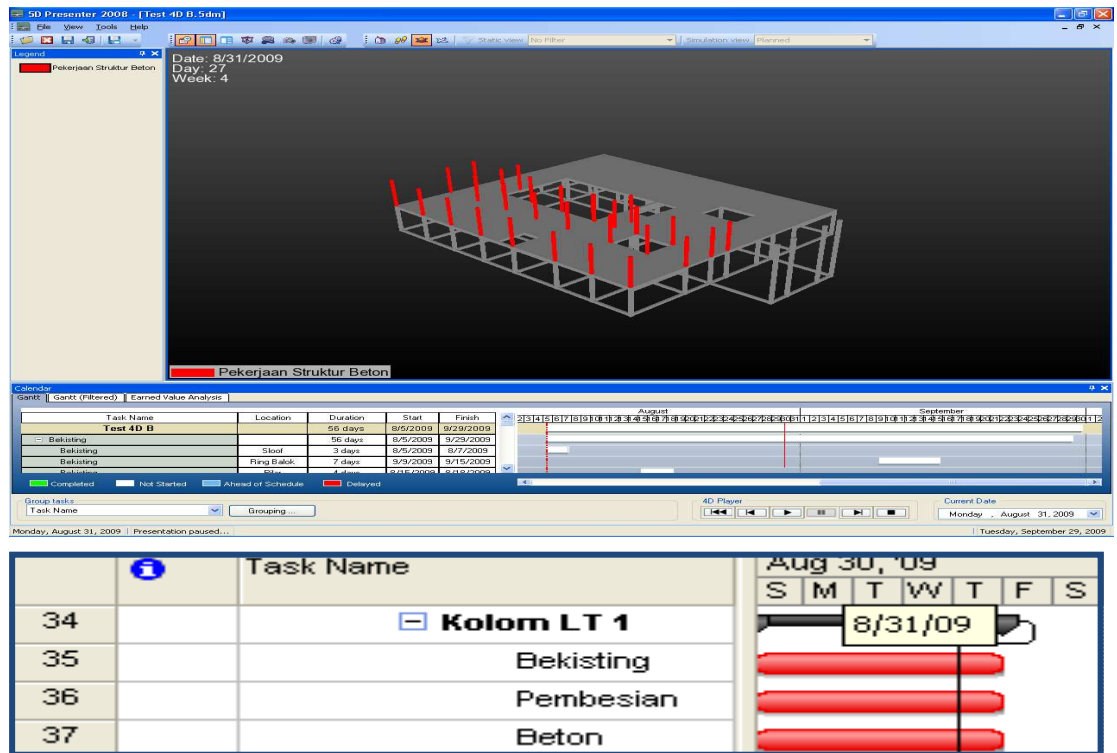
Gambar 15. Hasil Simulasi Pada Tanggal 19 Agustus 2009

Pada Gambar 15 pengguna dapat melihat pekerjaan pada tanggal 19 Agustus 2009 telah mencapai pada pengerjaan pilar yang berada di bagian depan bangunan telah mencapai tahap pengecoran. Pekerjaan bekisting dan pembesian balok pada zona B sedang dalam tahap pengerjaan termasuk juga pengerjaan bekisting dan pembesian pada pelat pada kedua zona juga dalam tahap pengerjaan. Perlu diperhatikan juga pekerjaan bekisting dan pembesian pada pelat di zona B termasuk kegiatan kritis yang apabila mengalami keterlambatan dalam penyelesaiannya akan mengganggu penyelesaian *item* pekerjaan yang lainnya.



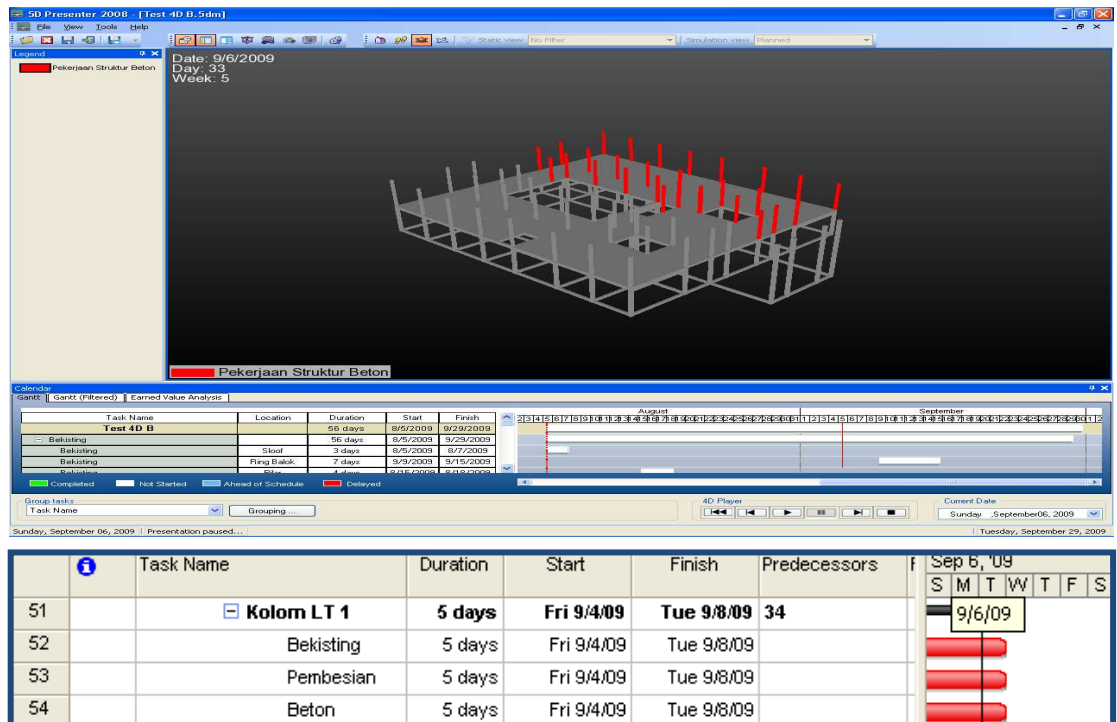
Gambar 16 Hasil Simulasi Pada Tanggal 25 Agustus 2009

Pada Gambar 16 dapat dilihat pada tanggal 25 Agustus 2009 pekerjaan bekisting, pembesian, dan pengecoran untuk balok dan pelat telah selesai dilakukan. Setelah seluruh *item* pekerjaan pada balok dan pelat selesai, perencana menentukan masa tenggang selama lima hari untuk melanjutkan pekerjaan pada item pengerjaan kolom di lantai satu.



Gambar 17 Hasil Simulasi Tanggal 31 Agustus 2009

Pada Gambar 17 pengguna dapat melihat dengan jelas pada tanggal 31 Agustus 2009 pengerjaan kolom di lantai satu. Dalam alur simulasi ini, pengguna dapat dengan jelas melihat tenggang waktu selama lima hari sebelum pekerjaan kolom di lantai satu dilakukan. Pengerjaan kolom tersebut termasuk dalam rangkaian kegiatan kritis.



Gambar 18 Hasil Simulasi Pada Tanggal 6 September 2009

Pada Gambar 18 pengguna dapat melihat pengerjaan kolom di lantai satu pada zona B. Pengerjaan kolom di lantai satu dilakukan secara berurutan, mulai dari pengerjaan kolom pada zona A kemudian berlanjut ke zona B. Pengerjaan kolom di lantai satu keseluruhannya termasuk dalam kegiatan kritis. Pengerjaan kolom di lantai satu dilakukan secara berurutan dikarenakan aksesibilitas material ke lantai satu membutuhkan pekerja untuk menyuplai material ke lantai satu. Material yang disuplai dapat berupa campuran beton apabila proses pengadukan beton dilakukan di lantai dasar dan juga materialnya dapat berupa besi tulangan untuk keperluan memasang tulangan beton.

6. KESIMPULAN

1. Simulasi sistem perencanaan 4D dapat dilakukan dengan mengintegrasikan gambar 3D model dengan jadwal.
2. Dalam pembuatan simulasi 4D, informasi data-data dari gambar 3D model harus dihubungkan ke sebuah database untuk mendefinisikan metode pengerjaan elemen bangunan.
3. Simulasi 4D memberikan gambaran terhadap metode pengerjaan yang akan digunakan, dan juga dapat dilakukan evaluasi terhadap jadwal proyek apabila terjadi konflik antar jenis pekerjaan.

4. Simulasi 4D merupakan alat komunikasi yang baik untuk menjelaskan kepada pihak lain/on teknis mengenai proses pelaksanaan proyek.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. Christiono, Joko.2005, Investigasi Potensi Pengembangan Perencanaan 4D dengan Teknologi Virtual Reality, Master Theses From JBPTITBSI,Bandung.
2. McKinneyK, Kim J, Fische M, Howard C, Interactive 4D-CAD (2006).
3. Srisomboon Wittaya , M Suphawut (2007), Four Dimensional Object Oriented Construction Project Planning.
4. Tanubrata, M (2008), Diktat Kuliah Manajemen Rekayasa Konstruksi, UKM,Bandung.
5. Zhang Jianping, Zhang Yang, Hu Zhenzhong, Lu Ming (2008) , Construction Management Utilizing 4D CAD and Operation Simulation Methodologies.

PENGARUH JENIS BAJA TULANGAN TERHADAP PERILAKU PLASTIFIKASI ELEMEN STRUKTUR SRPMK

Iswandi Imran^[1], Ronald Simatupang^[2]

ABSTRAK

Berdasarkan peraturan perencanaan beton bertulang untuk bangunan gedung (SNI 03-2847-02 Pasal 23), penulangan komponen struktur beton yang merupakan bagian dari sistem pemikul beban gempa sebaiknya menggunakan baja tulangan yang memiliki sifat-sifat mekanik yang nilai-nilainya tertentu. Jenis sifat mekanik yang dimaksud diantaranya adalah kuat leleh, kuat tarik, daktilitas, faktor kuat lebih (*overstrength*) dan rasio kuat tarik terhadap kuat leleh. Dikaitkan dengan sifat mekaniknya, baja tulangan yang beredar di Indonesia saat ini pada dasarnya dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori, yaitu baja tulangan yang memenuhi persyaratan sifat mekanik berdasarkan SNI 03-2847-02 Pasa 23 untuk struktur tahan gempa (baja tulangan *compliance*) dan baja tulangan yang tidak memenuhi persyaratan tersebut (baja tulangan *non-compliance*). Makalah ini menyajikan hasil studi eksperimental dan analitikal yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh jenis baja tulangan yang digunakan terhadap perilaku plastifikasi elemen struktur beton bertulang SRPMK yang dihasilkan. Dua jenis baja tulangan dikaji dalam studi ini, yaitu baja tulangan *compliance* dan baja tulangan *non-compliance*. Empat buah sampel balok kantilever diuji dalam studi ini terhadap beban monotonik dan siklik, yang mensimulasikan pengaruh beban gempa. Dua buah benda uji pertama diberi penulangan lentur dengan menggunakan baja tulangan *compliance* dan dua buah benda uji sisanya diberi penulangan lentur dengan menggunakan baja tulangan *non-compliance*. Perilaku elemen struktur yang dievaluasi meliputi perilaku histeresis yang dihasilkan oleh pembebanan siklik, tingkat daktilitas yang dimiliki, dan pola keruntuhan yang diperoleh. Hasil studi ini memperlihatkan bahwa penggunaan jenis baja tulangan yang *compliance*, yaitu baja tulangan yang sesuai dengan persyaratan SNI 03-2847-02 Pasal 23, pada komponen struktur beton bertulang SRPMK dapat menghasilkan perilaku plastifikasi struktur yang baik, khususnya terhadap pembebanan siklik yang mensimulasikan beban gempa. Sebaliknya, elemen struktur beton bertulang SRPMK yang diberi baja tulangan yang *non-compliance*, memperlihatkan perilaku plastifikasi struktur yang kurang baik.

Kata kunci: Baja tulangan *compliance*, baja tulangan *non-compliance*, elemen struktur SRPMK, faktor kuat lebih, rasio kuat tarik terhadap kuat leleh, daktilitas, histeresis.

1. PENDAHULUAN

Berdasarkan SNI beton yang berlaku, struktur beton bertulang tahan gempa pada umumnya direncanakan dengan mengaplikasikan konsep daktilitas. Dengan konsep ini, gaya gempa elastik dapat direduksi dengan suatu faktor modifikasi response struktur (faktor *R*), yang merupakan representasi tingkat daktilitas yang dimiliki struktur. Dengan penerapan konsep ini, pada saat gempa kuat terjadi, hanya elemen-elemen struktur bangunan tertentu saja yang diperbolehkan mengalami plastifikasi sebagai sarana untuk pendisipasian energi gempa yang diterima struktur. Elemen-elemen struktur lain yang tidak diharapkan mengalami plastifikasi haruslah tetap berperilaku elastis selama gempa kuat terjadi. Selain itu, hirarki atau urutan keruntuhan yang terjadi haruslah sesuai dengan yang direncanakan. Sifat material baja tulangan yang digunakan pada dasarnya dapat

mempengaruhi tercapai tidaknya hirarki atau urutan keruntuhan yang direncanakan. Untuk struktur beton tahan gempa, khususnya untuk sistem rangka penahan momen khusus (SRPMK), sifat mekanik dasar material baja tulangan yang penting diperhatikan agar hirarki keruntuhan rencana dapat terealisasi diantaranya adalah kuat leleh, kuat tarik, daktilitas, faktor kuat lebih (*overstrength*) dan rasio kuat tarik terhadap kuat leleh. Dikaitkan dengan sifat mekaniknya, baja tulangan yang beredar di Indonesia saat ini pada dasarnya dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori, yaitu baja tulangan yang memenuhi persyaratan sifat mekanik berdasarkan SNI 03-2847-02 Pasa 23 untuk struktur tahan gempa (baja tulangan *compliance*) dan baja tulangan yang tidak memenuhi persyaratan tersebut (baja tulangan *non-compliance*).

Makalah ini menyajikan hasil studi eksperimental dan analitikal terhadap penggunaan baja tulangan *compliance* dan *non-compliance* pada elemen struktur beton bertulang SRPMK. Tujuannya adalah untuk membuktikan signifikansi nilai parameter kuat lebih dan nilai rasio kuat ultimit yang dimiliki oleh baja tulangan dalam menghasilkan perilaku plastifikasi yang baik serta urutan keruntuhan elemen struktur yang sesuai dengan yang direncanakan dengan menggunakan prosedur desain kapasitas. Evaluasi dilakukan baik terhadap perilaku material baja tulangan jenis *compliance* dan *non-compliance* tersebut maupun terhadap perilaku elemen struktural yang diberi baja-baja tulangan jenis ini. Perilaku elemen struktur yang dievaluasi meliputi perilaku histeresis, daktilitas, dan pola keruntuhan yang diperoleh.

2. SPESIFIKASI BAJA TULANGAN

Berdasarkan SNI (BSN, 2002), parameter baja tulangan yang penting diperhatikan dalam penerapannya pada struktur beton yang diharapkan memikul beban gempa adalah daktilitas, nilai kuat lebih (*overstrength*), yaitu rasio nilai kuat tarik aktual terhadap kuat leleh aktual dan nilai rasio kuat ultimit, yaitu rasio kuat tarik aktual terhadap kuat leleh aktual. Nilai kuat lebih diperlukan untuk perencanaan struktur yang berbasis pada konsep desain kapasitas dan digunakan untuk merencanakan elemen struktur yang diharapkan tetap elastik pada saat sendi plastis terbentuk di elemen struktur yang langsung berhubungan dengannya. Prinsip ini sebagai contoh digunakan pada perencanaan geser di lokasi yang berpotensi membentuk sendi plastis, seperti di daerah hubungan balok-kolom dan di daerah ujung-ujung balok atau kolom. Berdasarkan SNI-03-2847-02 (BSN, 2002), gaya geser rencana pada lokasi sendi plastis harus dihitung berdasarkan nilai kuat momen

ujung terbesar yang mungkin terjadi di lokasi tersebut. Dalam penerapannya, momen-momen ujung tersebut, yaitu M_{pr} , dihitung dengan menggunakan nilai kuat leleh baja tulangan yang diperbesar 1,25 kali nya. Perbesaran ini dimaksudkan untuk mengantisipasi kuat lebih yang dimiliki oleh tulangan lentur yang digunakan.

Prinsip yang sama juga diterapkan pada perencanaan daerah pertemuan balok kolom, yang berdasarkan peraturan yang berlaku harus memenuhi persyaratan "kolom kuat balok lemah". Dalam memenuhi persyaratan ini, kolom-kolom yang merangka pada suatu hubungan balok-kolom harus memiliki kuat lentur yang 1,2 kali lebih besar dibandingkan dengan kuat lentur balok-balok yang merangka pada hubungan balok-kolom tersebut. Nilai perbesaran 1,2 tersebut pada dasarnya digunakan untuk mengakomodasi nilai overstrength yang dimiliki oleh baja tulangan lentur balok.

Panjang sendi plastis yang terbentuk pada ujung-ujung elemen struktur yang diharapkan mendisipasi energi gempa pada dasarnya sangat dipengaruhi oleh nilai rasio kuat ultimit, yaitu nilai rasio kuat tarik terhadap kuat leleh material baja tulangan yang digunakan. Panjang pendeknya daerah sendi plastis tersebut pada akhirnya akan mempengaruhi kapasitas rotasi inelastis yang dapat diberikan elemen struktur sehingga daktilitas struktur juga akan dipengaruhi. Jika baja tulangan yang digunakan memiliki nilai rasio kuat ultimit yang rendah, maka daktilitas struktur yang dihasilkan juga akan rendah. Dengan rendahnya tingkat daktilitas struktur, kemampuan struktur dalam memikul gaya gempa akan menjadi berkurang.

Berdasarkan SNI 03-2847-2002 Pasal 23 (BSN, 2002), untuk desain elemen struktur yang diharapkan memikul beban gempa, baja tulangan yang digunakan harus memenuhi ketentuan-ketentuan baja tulangan dengan mutu maksimum yang dispesifikasikan adalah 400 MPa (BJTD40), sesuai ASTM A 706M-1993 atau ASTM A 615M-1993. Berdasarkan persyaratan ini, nilai kuat leleh aktual maksimum untuk baja BJTD40 dibatasi 540 MPa. Dengan kata lain, nilai kuat lebih individu baja tulangan, yaitu rasio antara kuat leleh aktual terhadap kuat leleh spesifikasi, dibatasi maksimum sebesar $540/400 = 1,35$. Selain itu, rasio kuat tarik terhadap kuat leleh tulangan dipersyaratkan tidak boleh lebih kecil daripada 1,25.

Tidak semua baja tulangan yang tersedia di pasaran memenuhi persyaratan spesifikasi di atas. Berdasarkan hasil kajian I.Imran et al. (2005), baja tulangan yang tersedia di pasaran pada kenyataannya lebih banyak yang bersifat *non-compliance*.

3. PROGRAM EKSPERIMENTAL

3.1. Pengujian Material Baja Tulangan

Kuat leleh aktual yang terlalu tinggi pada dasarnya sangat berbahaya bagi rancangan struktur tahan gempa. Oleh karena itu, spesifikasi produksi baja tulangan harus mencantumkan nilai batas atas kuat leleh yang diijinkan. Sebagai contoh, SNI menetapkan batas atas kuat leleh hasil tes individu baja tulangan sebesar 540 MPa untuk baja tulangan mutu 400 MPa (BSN, 2002). Dalam SNI yang sama, untuk perencanaan elemen struktur SRPMK, kuat lebih αf_y - nya ditetapkan rata-rata sebesar $(1,25 \times 400) = 500$ MPa. Perbedaan ini bisa diterima dari sudut pandang statistik, karena nilai yang pertama merupakan batasan nilai individu sedangkan nilai yang kedua adalah batasan nilai rata-rata.

Tabel 1 dan **2** memperlihatkan hasil uji tarik dua jenis baja tulangan. Nilai-nilai tegangan yang ditampilkan pada tabel-tabel tersebut adalah nilai-nilai nominal. Baja tulangan jenis pertama adalah baja tulangan yang dapat dikelompokkan sebagai baja tulangan compliance (**Tabel 1**), sedangkan baja tulangan jenis kedua termasuk dalam kelompok baja tulangan *non-compliance* (**Tabel 2**). Berdasarkan batasan-batasan ASTM A706 dan ASTM A615M, kedua jenis baja tulangan tersebut masuk dalam kelompok mutu BJTD40. Data lengkap hasil uji dapat ditemukan dalam studi Simatupang (2006). **Tabel 1** memperlihatkan bahwa semua parameter hasil uji baja tulangan yang dikelompokkan sebagai baja tulangan *compliance* pada dasarnya memenuhi persyaratan SNI 03-2847-02 Pasal 23 (BSN, 2002). Nilai kuat leleh individu maksimum yang dihasilkan pada umumnya masih berada di bawah nilai maksimum yang diijinkan, yaitu 540 MPa (atau ekuivalen dengan nilai kuat lebih individu yang lebih kecil daripada nilai maksimum yang diijinkan, yaitu 1,35). Selain itu, nilai rata-rata kuat lebih baja tulangan yang dihasilkan tidak ada yang melewati nilai batas atas yang diijinkan, yaitu 1,25. Sedangkan nilai rata-rata rasio tegangan ultimit terhadap tegangan lelehnya pada umumnya lebih besar daripada nilai rata-rata minimum yang diijinkan, yaitu 1,25.

Tabel 1. Rangkuman Hasil Uji Tarik Baja Tulangan BJTD40 (Compliance)

No	Jumlah Sampel	Ukuran (mm)	Elongasi (%)	Kuat Leleh Individu Maks (MPa)	Kuat Leleh Rata rata (MPa)	Kuat Tarik Rata rata (MPa)	$\frac{f_{yu}}{f_y}$	$\frac{f_{yu}}{f_{ya}}$
1	29	D16	18.98	533,03	500.02	654.09	1.25	1.31
2	15	D19	19.07	483,28	466.72	637.62	1.17	1.37
3	15	D22	19.7	511.49	480.47	637.74	1.20	1.33

Tabel 2. Rangkuman Hasil Uji Tarik Baja Tulangan BJTD40 (*Non-Compliance*)

No	Jumlah Sampel	Ukuran (mm)	Elongasi (%)	Kuat Leleh Individu Maks (MPa)	Kuat Leleh Rata rata (MPa)	Kuat Tarik Rata rata (MPa)	$\frac{f_{yu}}{f_y}$	$\frac{f_{yu}}{f_y}$
1	44	D16	14.01	631.68	613.16	703.34	1.53	1.15
2	44	D19	15.43	617.85	583.52	662.32	1.46	1.14
3	38	D22	17.3	616.80	572.64	670.81	1.43	1.17

Hasil uji yang ditampilkan pada **Tabel 2** pada umumnya memperlihatkan nilai-nilai parameter baja tulangan yang tidak memenuhi persyaratan SNI 03-2847-02 (BSN, 2002). Nilai kuat leleh individu maksimum yang dihasilkan dapat mencapai nilai hingga di atas 600 MPa untuk berbagai diameter baja tulangan yang diuji. Selain itu, nilai kuat lebih rata-rata yang dihasilkan melewati batasan maksimum yang diijinkan, yaitu sebesar 1,25 dan sebaliknya nilai rasio kuat ultimitnya lebih kecil daripada nilai minimum yang diijinkan, yaitu 1,25.

Untuk mengkaji sejauh mana perbedaan sifat mekanis yang dimiliki oleh kedua jenis baja tulangan tersebut di atas akan dapat mempengaruhi perilaku plastifikasi elemen struktur SRPMK yang dihasilkan, maka pada studi ini juga dilakukan kajian perilaku struktural elemen-elemen struktur beton bertulang yang dipasang baja tulangan yang berbeda jenis tersebut.

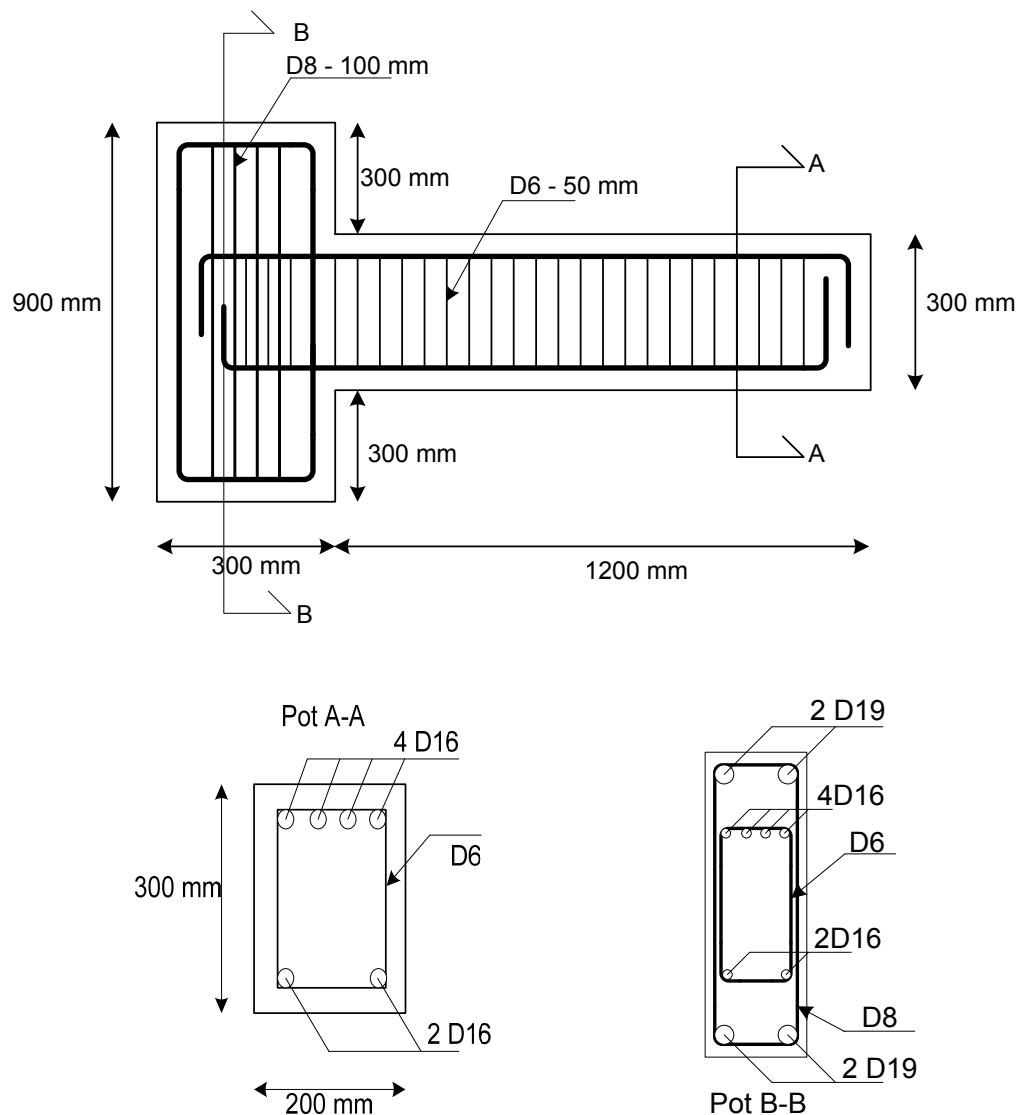
3.2. Pengujian Elemen Struktur

Untuk mempelajari pengaruhnya terhadap perilaku elemen struktur SRPMK yang dihasilkan, kedua baja tulangan yang dikaji (yaitu baja tulangan *compliance* dan baja tulangan *non-compliance*) diaplikasikan sebagai baja tulangan pada elemen struktur beton bertulang SRPMK. Elemen struktur yang digunakan untuk tujuan ini adalah balok kantilever sederhana (**Gambar 1**). Penulangan balok kantilever tersebut didesain dengan asumsi bahwa baja tulangan yang digunakan memenuhi persyaratan SNI 03-2847-02 Pasa 23 (BSN, 2002). Dengan demikian, faktor kuat lebih tulangan lentur yang digunakan untuk perencanaan geser mengikuti rekomendasi SNI untuk elemen struktur SRPMK, yaitu $\alpha=1,25$.

Dalam program eksperimental ini, dibuat 4 (empat) buah benda uji kantilever. Dua buah benda uji pertama diberi penulangan lentur dengan menggunakan baja tulangan *compliance* dan dua buah benda uji sisanya diberi penulangan lentur dengan menggunakan baja tulangan *non-compliance*. Penulangan geser untuk semua benda uji menggunakan baja tulangan yang sama, dengan kuat leleh 240 MPa. Mutu beton rencana

yang digunakan adalah 30 MPa. Elemen struktur dirancang sebagai elemen SRPMK, sehingga memiliki kuat geser yang lebih tinggi dibandingkan kuat lenturnya.

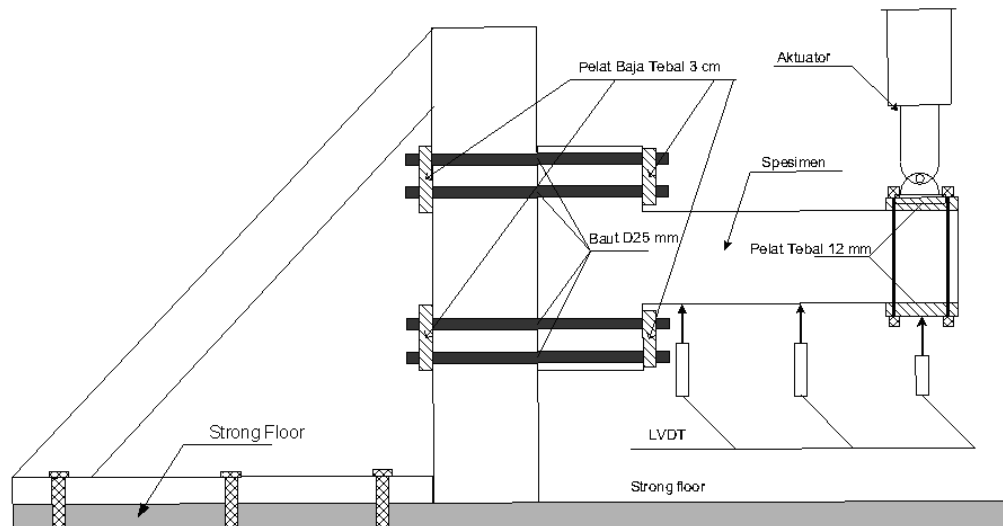
Dua jenis pengujian dilakukan pada masing-masing kelompok benda uji dengan jenis penulangan yang berbeda, yaitu uji beban monotonik dan uji beban siklik. Setup pengujian dapat dilihat pada **Gambar 2**. Beban siklik yang diaplikasikan mengikuti rekomendasi ACI Innovation Task Group 1 (2001a, 2001b), padamana pembebanan siklik ditingkatkan secara bertahap, dari $0,25 \Delta_y$ hingga maksimum $5 \Delta_y$ (**Gambar 3**).



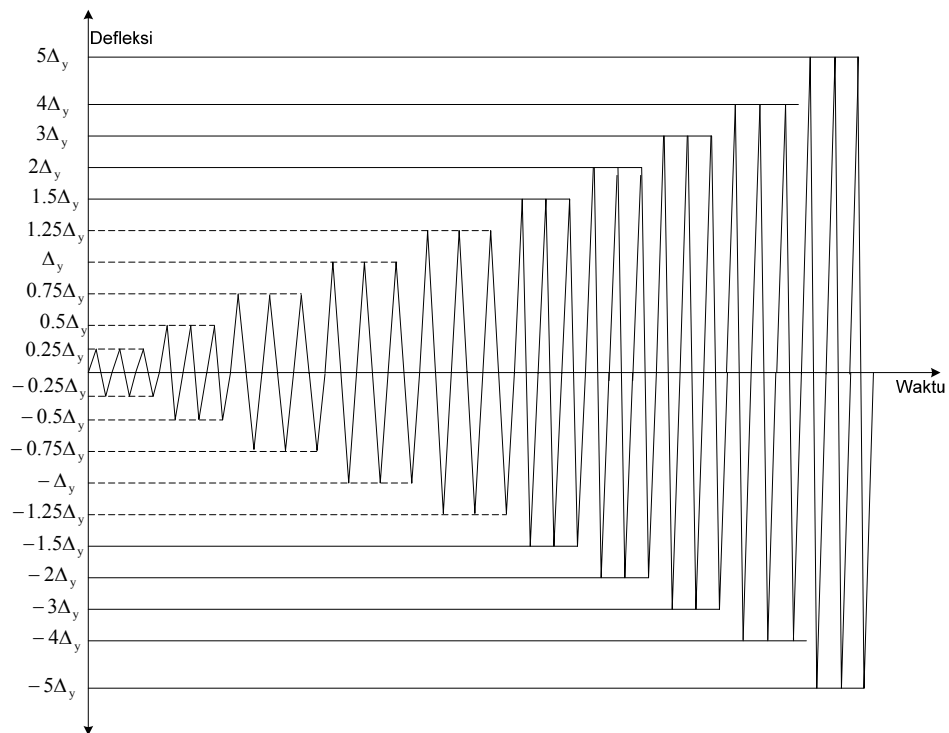
Gambar 1. Detail Geometri dan Penulangan Benda Uji

Gambar 4 dan **5** memperlihatkan hubungan beban-perpindahan pada benda uji monotonik, masing untuk benda uji dengan baja tulangan *compliance* dan *non-*

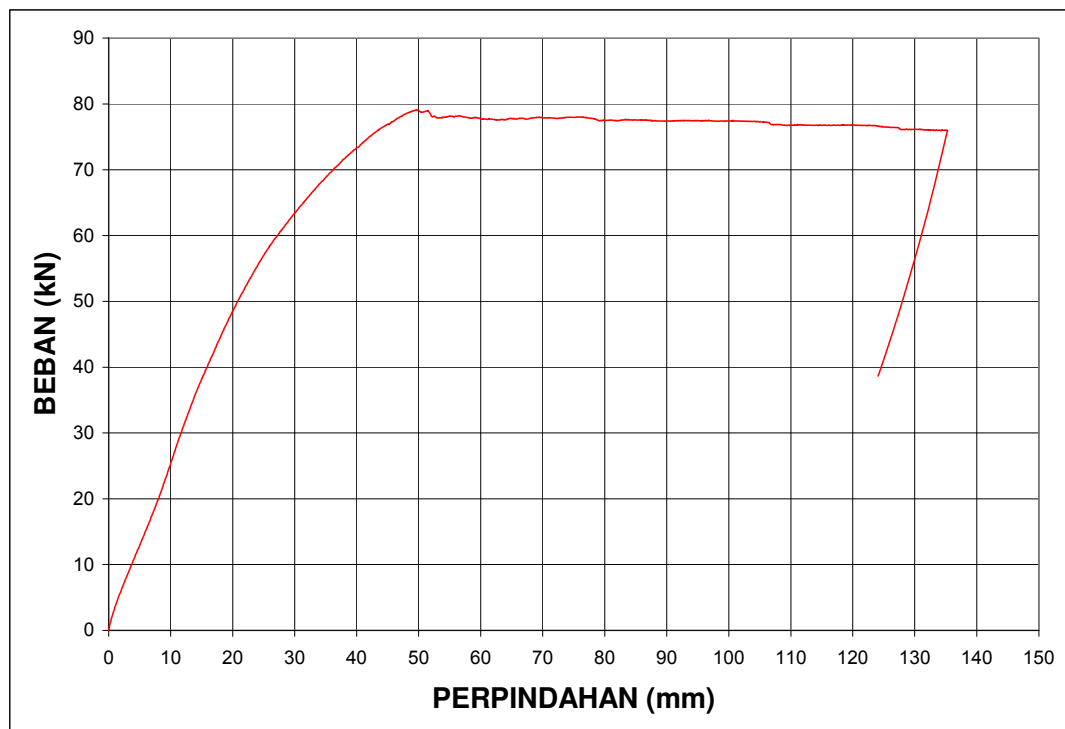
compliance. Berdasarkan gambar-gambar tersebut dapat dilihat bahwa benda uji dengan tulangan *non-compliance* memiliki kekuatan lentur yang lebih tinggi dibandingkan benda uji dengan tulangan *compliance*. Hal ini disebabkan karena kuat leleh baja tulangan *non-compliance* pada dasarnya lebih tinggi dibandingkan kuat leleh baja tulangan *compliance*. Namun, benda uji dengan tulangan *non-compliance* menghasilkan perilaku yang lebih getas dibandingkan benda uji dengan tulangan *compliance*. Benda uji dengan tulangan *non-compliance* mengalami penurunan kekuatan yang signifikan pada perpindahan 80 mm. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh terlalu berlebihannya tegangan yang terjadi pada baja tulangan lentur. Nilai tegangan yang berlebihan pada baja tulangan lentur dapat menyebabkan terjadinya penurunan tegangan lekatan (*bond losses*) pada bidang antarmuka antara baja tulangan dan beton. Hal ini pada akhirnya menyebabkan keruntuhan prematur pada benda uji.



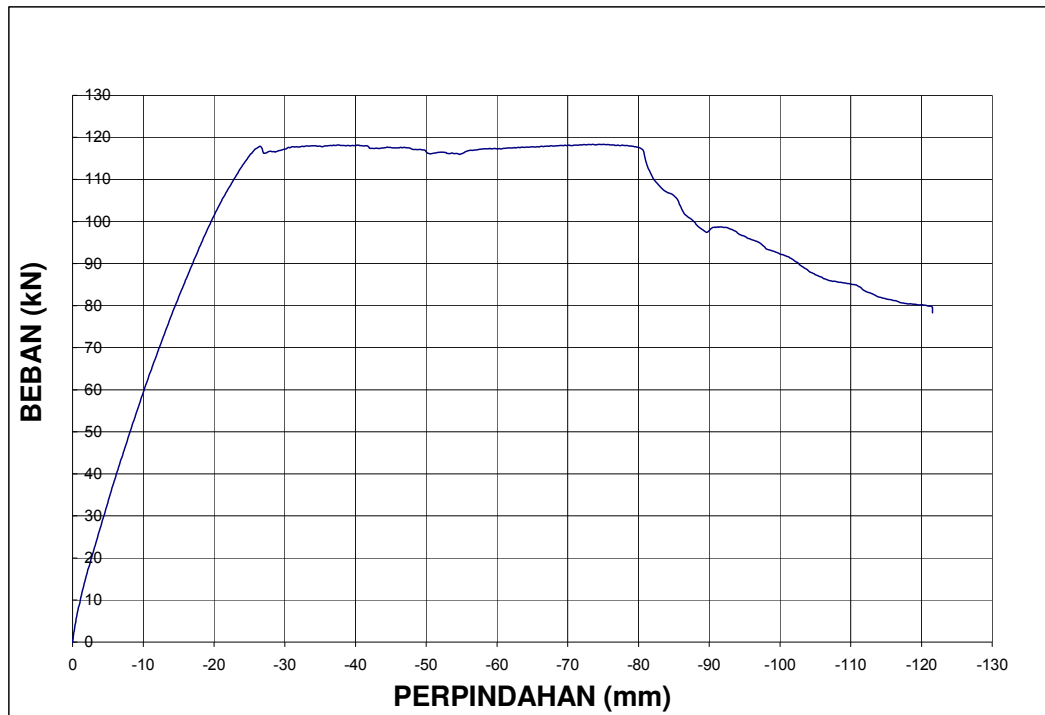
Gambar 2. Setup Pengujian Benda Uji



Gambar 3. Pola Pembebanan Siklik yang Diaplikasikan pada Benda Uji



Gambar 4. Hubungan Beban-Perpindahan pada Sampel Monotonik dengan Tulangan Compliance

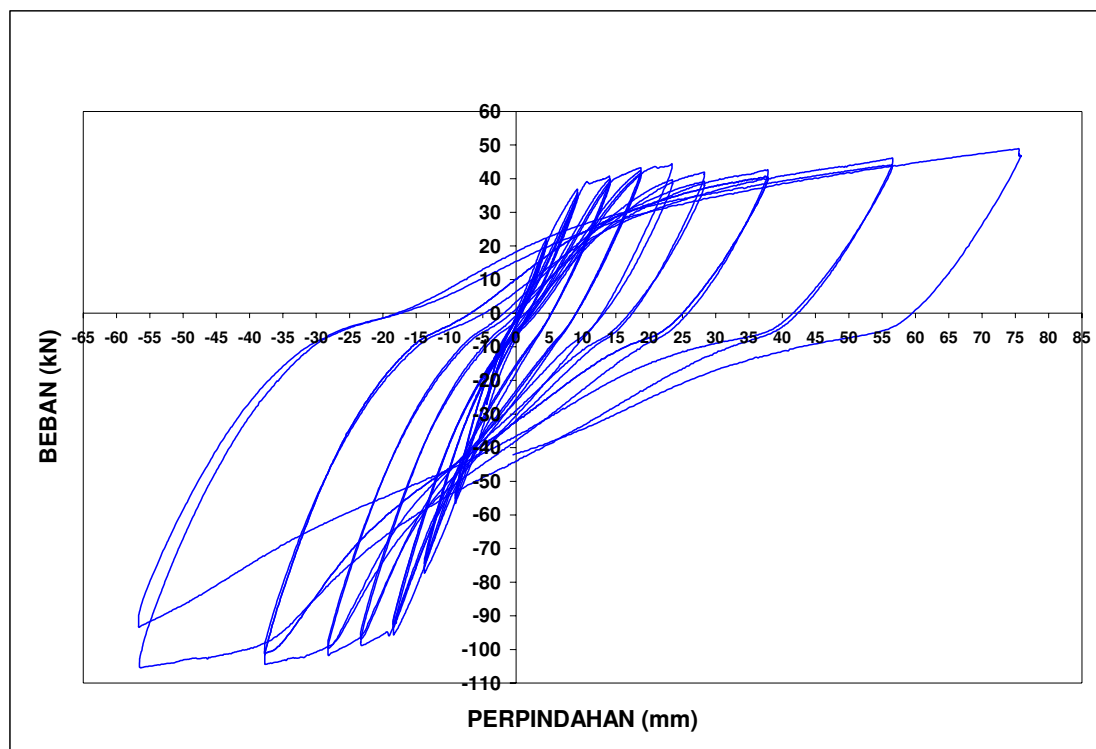


Gambar 5. Hubungan Beban-Perpindahan pada Sampel Monotonik dengan Tulangan *Non-Compliance*

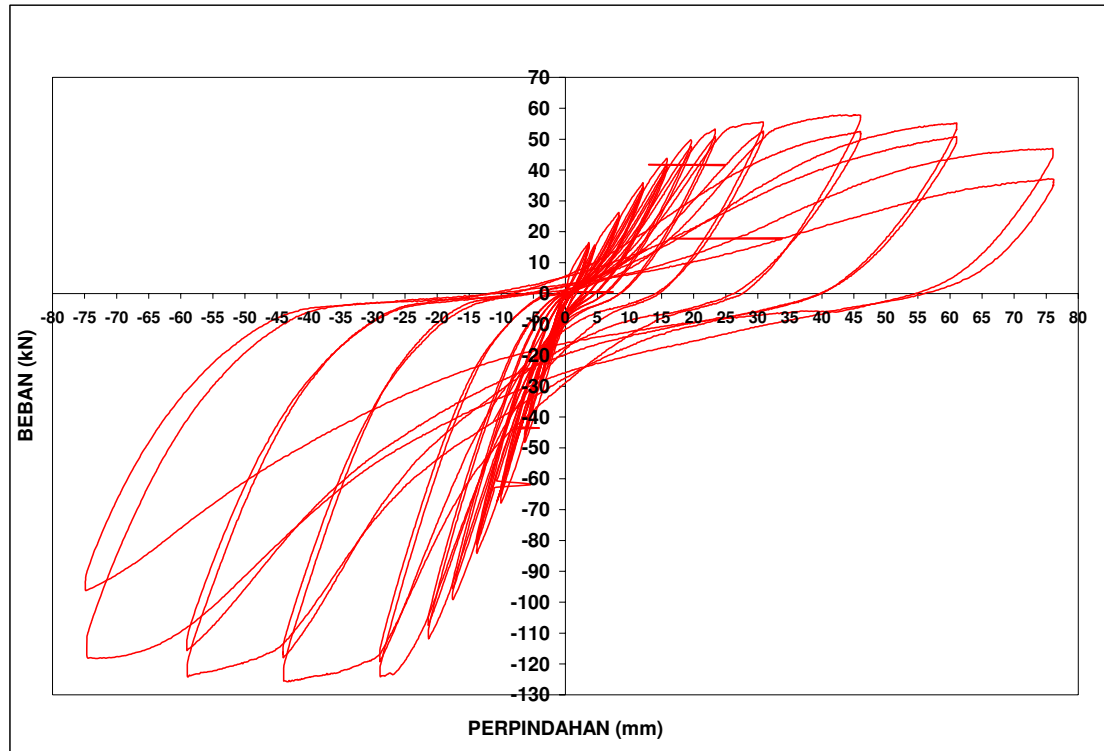
Gambar 6 dan **7** memperlihatkan perilaku histeresis masing-masing pada benda uji dengan baja tulangan *compliance* dan baja tulangan *non-compliance*. Berdasarkan gambar-gambar tersebut terlihat bahwa benda uji dengan baja tulangan *non-compliance* menghasilkan kurva histeresis yang tidak stabil dan memperlihatkan fenomena *pinching*. Selain itu, tingkat daktilitas yang dihasilkan pada dasarnya lebih rendah daripada yang dihasilkan benda uji dengan baja tulangan *compliance*. Benda uji tersebut mengalami penurunan kekuatan yang lebih awal dibandingkan benda uji dengan baja tulangan *compliance*. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Nilai kuat lebih baja tulangan *non-compliance* yang terlalu besar menyebabkan timbulnya tegangan yang berlebihan pada baja tulangan lentur longitudinal. Hal ini dapat menyebabkan timbulnya tegangan geser dan lekatan yang tinggi pada saat tercapainya momen leleh pada penampang. Kondisi ini dapat memicu terjadinya *bond losses* dan pada akhirnya keruntuhan prematur pada elemen struktur. Selain itu, dengan tingginya nilai kuat lebih yang dimiliki tulangan lentur, keruntuhan balok yang semula direncanakan didominasi oleh keruntuhan lentur pada akhirnya dipengaruhi oleh keruntuhan geser. Hal ini terjadi akibat penulangan geser terpasang tidak mampu mengakomodasi peningkatan gaya geser yang terjadi dengan adanya peningkatan kuat lentur penampang. Perlu diingat bahwa balok kantilever ini

direncanakan dengan asumsi baja tulangan yang digunakan memenuhi persyaratan SNI 03-2847-02 Pasal 23. Fenomena pinching yang terlihat jelas pada kurva histeresis benda uji dengan baja tulangan *non-compliance* merupakan indikasi adanya pengaruh geser yang dominan pada keruntuhan elemen struktur.

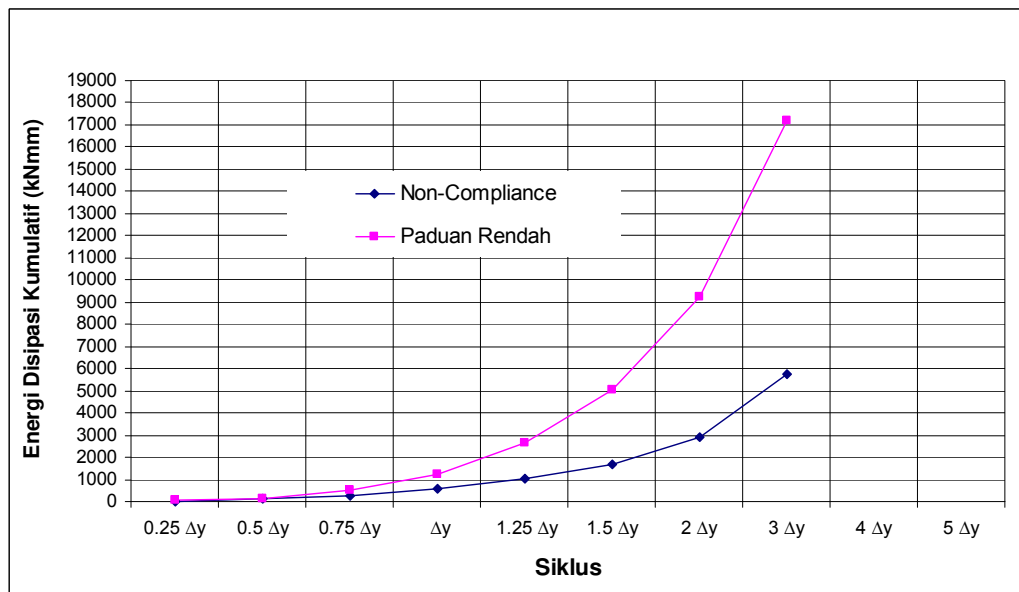
Gambar 8 memperlihatkan perbandingan disipasi energi yang dihasilkan masing-masing benda uji. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa benda uji dengan baja tulangan *compliance* memberikan disipasi energi yang lebih tinggi dibandingkan benda uji dengan baja tulangan *non-compliance* di setiap siklus beban yang diaplikasikan. Rendahnya disipasi energi yang dihasilkan benda uji dengan baja tulangan *non-compliance* ini merupakan refleksi adanya fenomena pinching pada kurva histeresisnya.



Gambar 6. Kurva Histeresis Benda Uji dengan Baja Tulangan *Compliance*



Gambar 7. Kurva Histeresis Benda Uji dengan Baja Tulangan *Non-Compliance*



Gambar 8. Perbandingan Energi Disipasi Kumulatif

Untuk mengevaluasi pengaruh rendahnya nilai rasio kuat ultimit baja tulangan terhadap perilaku elemen struktur yang dihasilkan, dilakukan simulasi numerik terhadap elemen balok kantilever yang diberi baja tulangan dengan variasi nilai rasio kuat ultimit dari 1,0 hingga 1,5. Penampang yang dianalisis memiliki rasio tulangan tekan terhadap tulangan tarik sebesar 0,5. Sedangkan rasio tulangan tarik (dengan asumsi baja tulangan

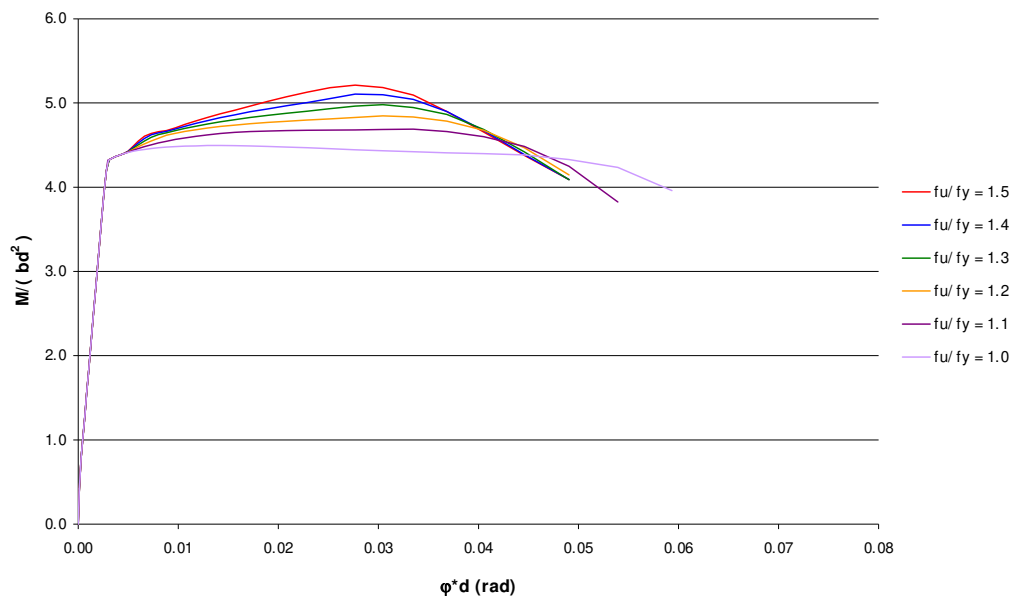
pada penampang hanya satu lapis) ditetapkan sama dengan 0,5 rasio tulangan maksimum yang diijinkan. Hasil simulasi ini dapat dilihat pada **Gambar 9** berupa kurva hubungan momen-kelengkungan penampang. Berdasarkan grafik simulasi pada **Gambar 9** tersebut dapat dilihat bahwa penampang beton bertulang dengan baja tulangan yang memiliki nilai rasio kuat ultimit yang kurang dari 1,20 memperlihatkan peningkatan kekuatan (*hardening*) yang lebih rendah setelah tercapainya momen leleh dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh elemen beton bertulang yang nilai rasio kuat ultimitnya lebih besar daripada 1,20. Fenomena *hardening* ini diperlukan agar dapat terjadi perambatan kelelahan (redistribusi) ke arah tengah bentang setelah tercapainya momen leleh pada penampang didekat muka tumpuan. Dengan terjadinya perambatan kelelahan ke arah tengah bentang, panjang sendi plastis yang dihasilkan akan bertambah panjang dan tingkat daktilitas perpindahan elemen struktur yang dihasilkan juga akan meningkat.

4. PENUTUP

Makalah ini membahas hasil evaluasi terhadap penerapan baja tulangan *compliance* dan *non-compliance* pada elemen struktur SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus). Aspek yang dievaluasi meliputi perilaku material baja tulangan dan perilaku elemen struktur beton bertulang SRPMK yang diberi baja tulangan tersebut. Baja tulangan *compliance* yang dikaji pada umumnya memenuhi semua persyaratan SNI 03-2847-2002 Pasal 23, khususnya terkait dengan persyaratan baja tulangan untuk bangunan tahan gempa. Sedangkan baja tulangan *non-compliance* yang dikaji memiliki nilai kuat lebih yang berlebihan (yaitu $\alpha > 1,50$) dan nilai rasio kuat ultimit yang rendah, yaitu maksimum 1,20. Sebagai verifikasi, telah dilakukan pengujian elemen struktur SRPMK sederhana untuk membuktikan signifikansi nilai parameter-parameter mekanik baja tulangan tersebut dalam menghasilkan urutan keruntuhan yang sesuai dengan yang direncanakan dengan menggunakan prosedur desain kapasitas.

Berdasarkan evaluasi terhadap aspek struktural, penggunaan baja tulangan *compliance*, yang sesuai dengan spesifikasi SNI 03-2847-02 Pasal 23, pada komponen struktur SRPMK menghasilkan perilaku plastifikasi struktur yang lebih baik, khususnya terhadap pembebanan siklik yang mensimulasikan beban gempa. Sebaliknya, elemen struktur beton yang diberi tulangan yang *non-compliance*, memperlihatkan perilaku plastifikasi struktur yang kurang baik.

Berdasarkan hasil kajian ini, secara umum dapat disimpulkan bahwa karakteristik baja tulangan yang digunakan pada struktur beton bertulang SRPMK akan sangat mempengaruhi perilaku plastifikasi struktur yang dihasilkan. Parameter baja tulangan yang paling berpengaruh terhadap perilaku disipasi yang dihasilkan pada elemen struktur adalah nilai rasio kuat lebih dan nilai rasio kuat ultimit. Nilai-nilai rasio kuat lebih serta kuat ultimit baja tulangan yang digunakan sebaiknya selalu berada dalam batas-batas yang diijinkan peraturan yang berlaku untuk mencegah terjadinya keruntuhan prematur pada sistem struktur yang direncanakan.



Gambar 9. Kurva Hubungan Momen-Kelengkungan untuk Berbagai Nilai Rasio Kuat Ultimit

DAFTAR PUSTAKA

1. ACI Innovation Task Group 1 (2001a). "Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing." *ACI T1.1-01*, American Concrete Institute, pp. T1.1-1-3.
2. ACI Innovation Task Group 1 (2001b). "Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing." *ACI T1.1-R01*, American Concrete Institute, pp. T1.1R-1-7.
3. ASTM A 615M (1993a). "Standard Specification for Deformed and Plain Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement." *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 01.04, pp. 303 - 308.

4. ASTM A 706M (1993b). "Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement." *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 01.04, pp. 353 - 357.
5. BSN (2002). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung* (SNI 03-2847-2002).
6. Gamble, W. L. (2003). "Thermex-Processed Reinforcing Bars – Heat Treatment Increases Ductility and Weldability of Steel." *Concrete International*, Juli, pp. 85 – 88.
7. Imran , I ., Hoedajanto, D., dan Kusumastuti, D. (2005). "Baja Tulangan Vanadium Vs Baja Tulangan Tempcore: Perbandingan Karakteristik Mekanik." *Prosiding HAKI 2005, Seminar Teknik Tradisi dan Inovasi*, Jakarta 23-24 Agustus.
8. Pamujie, E. dan Gunawan, M. (2006). "Perilaku Plastifikasi Elemen Struktur Beton Bertulang dengan Tulangan yang Tidak Memenuhi Persyaratan SNI 03-2847-2002 Pasal 23." *Tugas Akhir S1, Prodi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung*.

[¹] **Iswandi Imran** adalah dosen Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung

[²] **Ronald Simatupang** adalah dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha, Bandung

PEMODELAN NUMERIK PERILAKU KERUNTUHAN BALOK TINGGI BETON BERTULANG

Yosafat Aji Pranata¹, Bambang Suryatmono²

¹Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha
Jalan Prof. drg. Suria Sumantri, MPH., No. 65, Bandung, Jawa Barat
E-mail : yosafat.ap@eng.maranatha.edu

²Guru Besar, Program Pascasarjana, Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Merdeka No. 30, Bandung, Jawa Barat

ABSTRACT

Strut-and-tie model is design method based on D and B regions comprehension of reinforced concrete structures. Strut-and-tie model developed by Schlaich [Schlaich et al., 1987] at Uni-Stuttgart, Jerman. And then developed [Adebar et al., 1990; Jirsa et al., 1991; Reineck, 1996, 1999, 2002; ACI 318R, 2002, 2005, 2008]. Objectives of this research are to study strut-and-tie method for design of reinforced concrete deep beam, numerical simulation study using finite element method ADINA to found out parameters for strut-and-tie method. Sample beam that used in this research is based on Hardjasaputra's deep beam experimentals report [Hardjasaputra, 2006]. Results from this research indicated that %-relative difference (displacement) between ADINA simulation and experimental range from 25,49%-27,71%. %-relative difference (z-strain) between ADINA simulation and experimental range from 10,53%-17,25%. Value of uniaxial cut-off tensile stress (f_{ct}) affect to ultimate load that can be reached.

Keywords: Strut-and-tie model, Deep beam, Reinforced Concrete, Finite element method.

ABSTRAK

Metode *strut-and-tie model* merupakan metode perencanaan struktur yang didasarkan pada pemahaman tentang adanya daerah D dan daerah B pada struktur beton bertulang. Untuk itu, metode *strut-and-tie model* dirintis oleh penelitian yang dilakukan oleh Schlaich [Schlaich et al., 1987] di Uni-Stuttgart, Jerman. Selanjutnya berkembang pesat [Adebar et al., 1990; Jirsa et al., 1991; Reineck, 1996, 1999, 2002; ACI 318R, 2002, 2005, 2008]. Tujuan penelitian ini adalah mempelajari metode *strut-and-tie model* untuk perencanaan balok tinggi beton bertulang, mempelajari simulasi numerik model benda uji dengan menggunakan metode elemen hingga dengan ADINA untuk mendapatkan parameter yang diperlukan dalam perencanaan metode *strut-and-tie model*. Model benda uji dalam penelitian ini diambil dari hasil penelitian eksperimental balok tinggi Hardjasaputra [Hardjasaputra, 2006]. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa perbedaan %_relatif lendutan balok hasil simulasi ADINA terhadap eksperimental berkisar antara 25,49%-27,71%. Perbedaan %_relatif regangan-z hasil simulasi ADINA terhadap eksperimental berkisar antara 10,53%-17,25%. Penentuan nilai *uniaxial cut-off tensile stress* (f_{ct}) berpengaruh terhadap beban ultimit yang dapat dicapai oleh balok.

Kata Kunci: *Strut-and-tie model*, Balok tinggi, Beton bertulang, Metode elemen hingga.

1. PENDAHULUAN

Perilaku keruntuhan struktur balok tinggi sangat perlu dipelajari untuk mengetahui kinerja struktur. Perilaku tersebut dapat diketahui dengan simulasi laboratorium melalui uji

eksperimental benda uji struktur balok dengan riwayat pembebanan pada struktur sampai runtuh, atau melalui simulasi numerik metode elemen hingga dengan menggunakan perangkat lunak (*software*). Pada simulasi laboratorium, pemahaman yang benar mengenai idealisasi suatu struktur balok yang sebenarnya menjadi model yang akan diuji di laboratorium, teknik pemasangan *strain gauges*, model dan tipe beban, serta model tumpuan sangat berpengaruh terhadap hasil analisis yang diperoleh. Pemodelan dan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak memerlukan pemahaman dasar teori dan konsep.

Tujuan dari penelitian dalam penulisan ini adalah mempelajari metode *strut-and-tie model* untuk perencanaan balok tinggi beton bertulang, mempelajari simulasi numerik metode elemen hingga pada model benda uji untuk mendapatkan parameter yang diperlukan dalam perencanaan *strut-and-tie model*, mempelajari perilaku keruntuhan balok tinggi beton bertulang, dan melakukan studi perbandingan hasil simulasi numerik metode elemen hingga pada model benda uji balok tinggi dengan hasil penelitian eksperimental Hardjasaputra [Hardjasaputra, 2006].

Penelitian menggunakan batasan/ruang lingkup model benda uji diambil dari hasil penelitian eksperimental balok tinggi beton bertulang yang dilakukan oleh Hardjasaputra [Hardjasaputra, 2006], perhitungan metode *strut-and-tie model* mengacu pada peraturan ACI 318R-08 [ACI, 2008], dan simulasi numerik model benda uji dengan metode elemen hingga dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *ADINA*. Parameter yang dipelajari yaitu deformasi, kekuatan *strut* diagonal, dan kuat ultimit balok. Pemodelan benda uji 2D (*plane stress*).

2. TINJAUAN LITERATUR

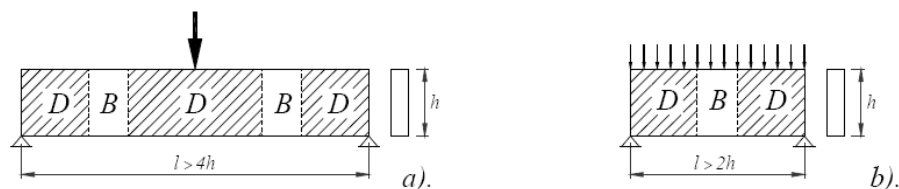
Balok tinggi adalah elemen struktur dengan beban pada suatu permukaan tertentu dan tumpuan pada permukaan lainnya, yang terletak pada posisi berlawanan, sehingga penunjang tekan dapat dikembangkan pada daerah antara beban dan tumpuan tersebut. Balok tinggi merupakan balok dengan kriteria perilaku keruntuhan geser. Balok dikategorikan sebagai balok tinggi apabila mempunyai panjang bentang bersih (l_n) sama atau lebih kecil dibandingkan empat kali tingginya [ACI, 2008].

Metode *strut-and-tie model* merupakan metode perencanaan struktur yang didasarkan pada pemahaman tentang adanya daerah D dan daerah B pada struktur beton bertulang. Daerah B adalah bagian struktur yang penampangnya mempunyai distribusi

regangan linier sehingga teori balok lentur klasik dapat diterapkan. Daerah D yaitu bagian struktur yang mengalami perubahan geometri atau bisa juga bagian yang ditempati beban terpusat yang menyebabkan pada bagian tersebut mempunyai distribusi regangan non-linier.

Suatu cara perencanaan yang merata dan konsisten untuk semua tipe struktur serta semua bagian struktur sangat diperlukan, konsep tersebut harus didasarkan pada model fisik yang realistis. Untuk itu, metode *strut-and-tie model* dirintis oleh penelitian yang dilakukan oleh Schlaich [Schlaich et al., 1987] di Uni-Stuttgart, Jerman. Selanjutnya berkembang pesat [Adebar et al., 1990; Jirsa et al., 1991; Reineck, 1996, 1999, 2002], sampai akhirnya diadopsi oleh American Concrete Institute pada peraturan ACI 318-02 [ACI, 2002]. Penelitian eksperimental di Indonesia antara lain telah dilakukan oleh Hardjasaputra [Hardjasaputra, 2006], yaitu penelitian eksperimental pembebanan sampai runtuh balok beton bertulang. Balok beton bertulang yang diuji mempunyai perbandingan bentang dan tinggi sebesar $2,25/0,8 = 2,8125$, lebih besar dari 2,5 sehingga menurut kriteria ACI 318R-08 [ACI, 2008] sebenarnya belum termasuk kategori balok tinggi. Meskipun demikian dari perilaku keruntuhan yang diperlihatkan yaitu keruntuhan geser (*diagonal splitting*) maka dapat dikategorikan sebagai balok tinggi (*deep-beam*), yang mana perilakunya sangat berbeda dengan tipe balok biasa karena bukan keruntuhan lentur. Balok tinggi tersebut mempunyai bentuk balok biasa persegi, sebelum diuji ditanamkan beberapa *strain gauges* dan selanjutnya dilakukan uji beban sampai mencapai kondisi runtuh. Selama pembebanan, regangan dan lendutan dicatat secara otomatis dalam alat ukur elektronik, pola retak pada balok digambar secara manual. Dengan demikian dapat diperoleh informasi tentang perilaku keruntuhan balok tinggi.

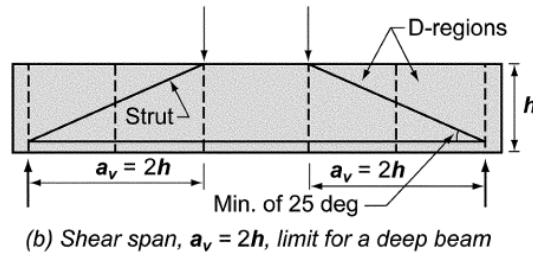
Daerah B dan D dari beberapa tipe balok yang diberi beban terpusat dan beban merata diperlihatkan pada Gambar 2.3. Daerah D atau daerah B terbentuk karena dipengaruhi rasio tinggi terhadap bentang, adanya perubahan geometri struktur yang menyolok, tipe beban, dan lokasi tumpuan. Konfigurasi geometri dan beban menentukan daerah D maupun daerah B.



Gambar 2.3 Daerah B dan D [Schlaich et al., 1987]

Untuk struktur yang pernah dianalisis dengan *strut-and-tie model* tentu saja model *truss*-nya dapat ditiru kembali, karena bagaimanapun juga model *truss* tersebut adalah sudah tertentu. Untuk struktur baru, pemakaian perangkat lunak metode elemen hingga dengan elemen dua dimensi (membran atau *shell*) dapat membantu memperlihatkan aliran gaya-gaya berdasarkan trajektori tegangan elastiknya, dari situ kemudian dapat diperkirakan lokasi penempatan *strut* dan *tie*, Schlaich secara detail memberikan tahapan-tahapan dalam penyusunan model *strut-and-tie model* dari beberapa model struktur [Schlaich et al., 1987].

Dimensi yang digunakan untuk mengevaluasi komponen rangka batang (*truss*) pada dasarnya hanya berupa model, sementara bentuk fisik tidak seperti itu. Oleh karena itu perlu diketahui berapa tegangan efektif sebenarnya yang bekerja pada komponen tersebut.



Gambar 2.4 Balok Tinggi [ACI, 2008]

Ketentuan-ketentuan perencanaan komponen-komponen *strut-and-tie model* diatur pada Appendix A “*Strut-and-Tie Models*” ACI 318R-08 [ACI, 2008], dalam segala hal harus memenuhi persyaratan kekuatan sebagai berikut:

$$\phi.F_n \geq F_u \quad (2.1)$$

Kekuatan *strut* dihitung berdasarkan Persamaan 2.2.

$$F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs} \quad (2.2)$$

$$f_{ce} = 0,85 \cdot \beta_s \cdot f'_c \quad (2.3)$$

Kekuatan *tie* dihitung berdasarkan Persamaan 2.4.

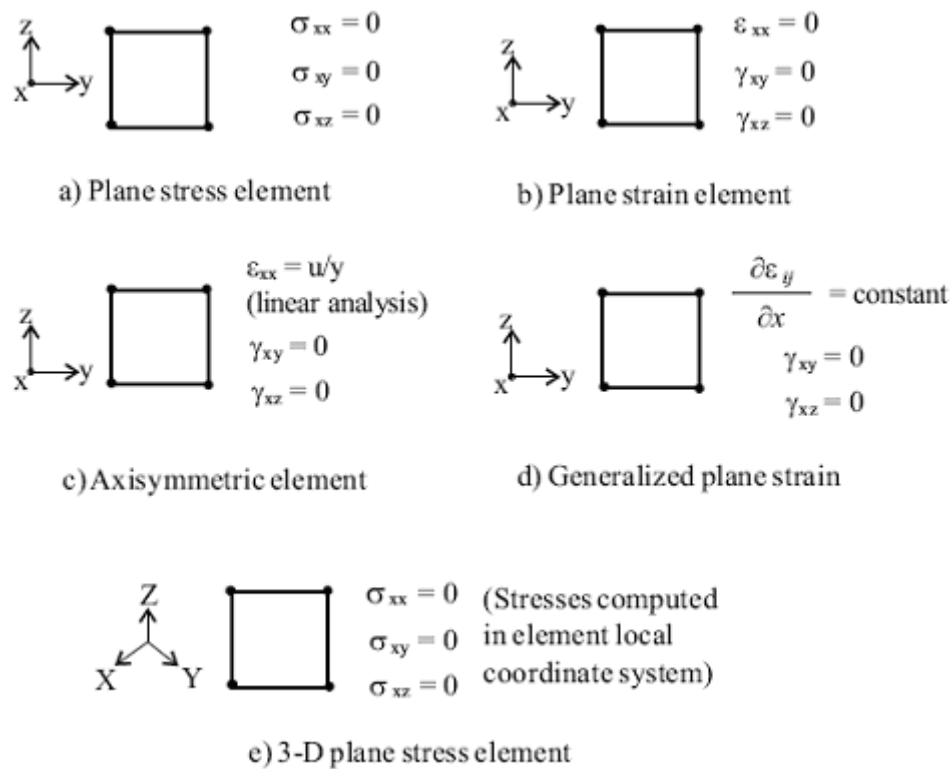
$$F_{nt} = A_{st} \cdot f_y \quad (2.4)$$

Kekuatan area titik nodal dihitung berdasarkan Persamaan 2.5.

$$F_{nn} = f_{ce} \cdot A_{nz} \quad (2.5)$$

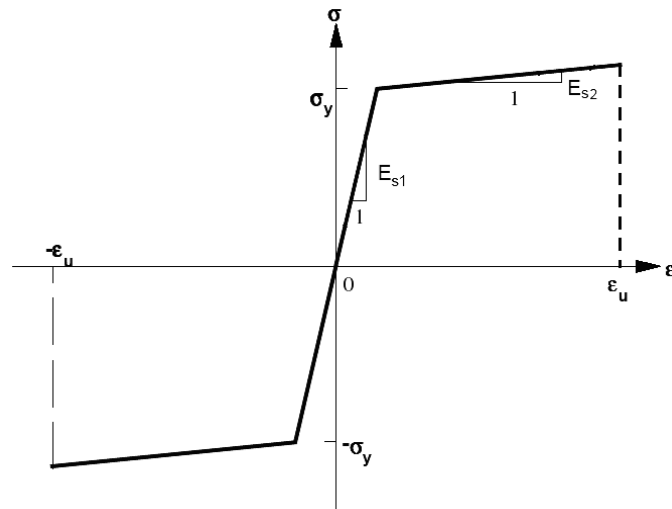
$$f_{ce} = 0,85 \cdot \beta_n \cdot f'_c \quad (2.6)$$

Implementasi simulasi numerik model benda uji dengan metode elemen hingga dengan pemodelan nonlinier pada perangkat lunak *ADINA* dilakukan secara terpisah antara perilaku material dengan elemen. Untuk mempelajari perilaku material, maka digunakan fitur material khusus yang telah tersedia pada perangkat lunak *ADINA* yaitu material beton. Sedangkan model elemen menggunakan model *solid 2D*, sehingga analisis menggunakan pendekatan *plane stress*. Pemodelan baja tulangan dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan fitur elemen *solid 2D* yang dikombinasikan dengan perilaku material bilinear baja. Ilustrasi penjelasan elemen solid ditampilkan pada Gambar 2.7, penjelasan asumsi dasar *plane stress* ditampilkan pada Gambar 2.8.



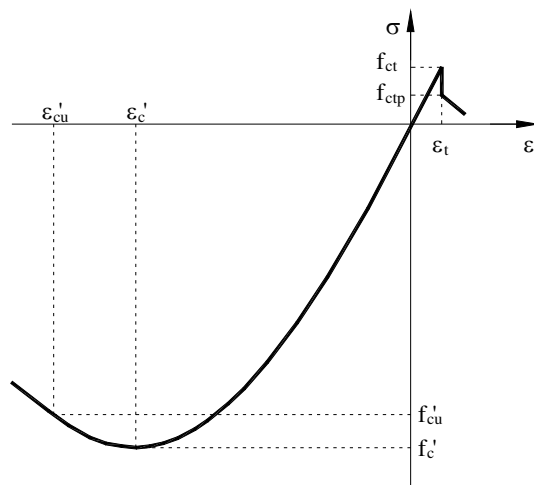
Gambar 2.8 Asumsi Dasar pada Analisis 2 Dimensi [ADINA, 2005]

Properti tulangan baja ditetapkan sebagai suatu hubungan tegangan-regangan tunggal untuk mendefinisikan bahan material. Kurva hubungan tegangan-regangan dari tulangan baja yang digunakan untuk perencanaan struktur beton diperoleh dari uji tulangan yang dibebani secara monotonik tarik.



Gambar 2.9 Kurva Tegangan-Regangan Baja Tulangan [ADINA, 2005]

Material beton dalam perangkat lunak *ADINA* dianggap benar-benar untuk memodelkan beton itu sendiri tanpa memasukkan parameter baja tulangan. Model material ini disebut *concrete model* [ADINA, 2005].

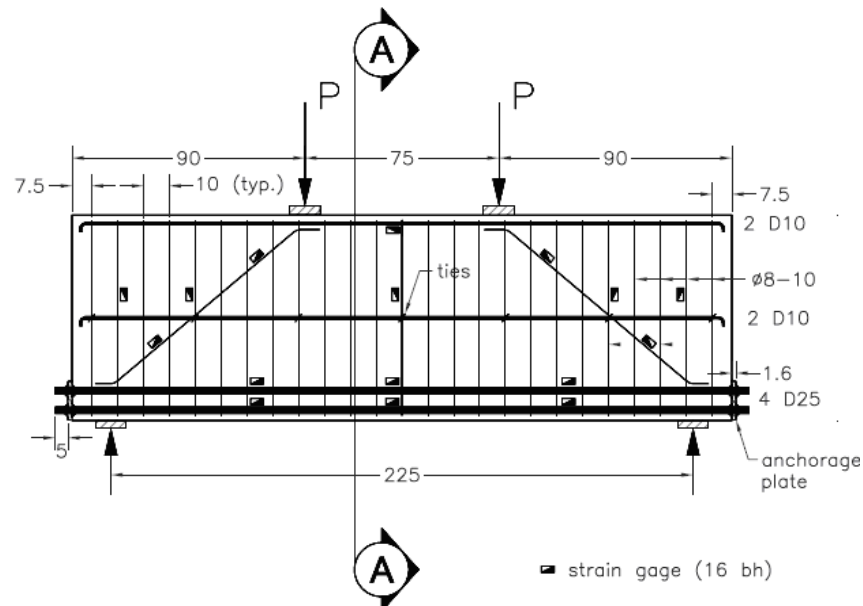


Gambar 2.10 Hubungan Tegangan-Regangan Uniaksial Beton [ADINA, 2005]

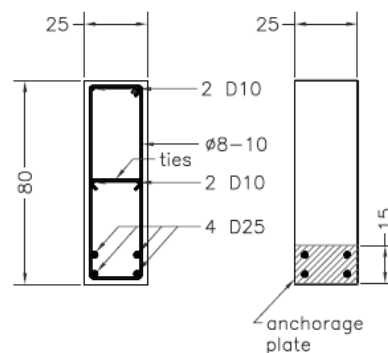
3. STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

Studi kasus dalam penelitian ini menggunakan model balok tinggi beton bertulang hasil penelitian eksperimental balok tinggi [Hardjasaputra, 2006]. Material yang digunakan yaitu baja tulangan dengan properti tegangan leleh (f_y) sebesar 435 MPa dan beton dengan

kuat tekan (f'_c) sebesar 37 MPa. Proses uji eksperimental yang telah dilakukan adalah pengujian balok tinggi dengan riwayat pembebanan secara bertahap sampai dengan runtuh. Tahapan riwayat waktu pembebanan dibagi kedalam tiga tahap, yaitu beban sebesar 300 kN, 600 kN dan 1100 kN.

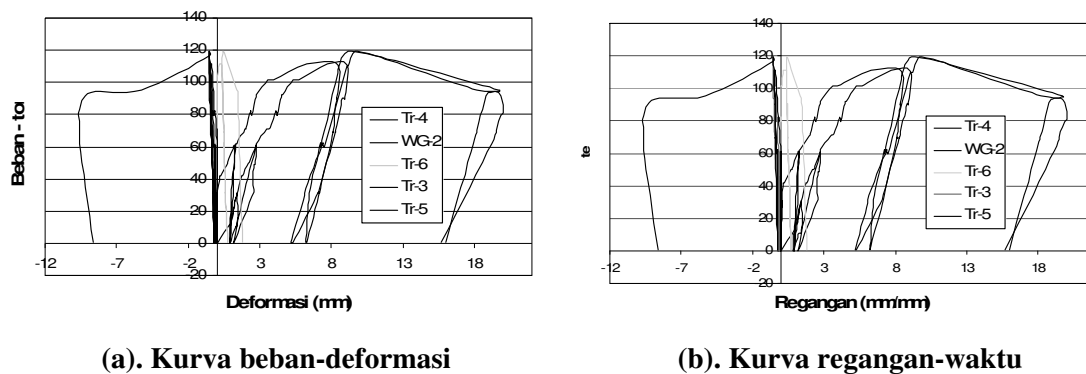


Gambar 3.1 Detail Dimensi dan Penulangan Balok Tinggi [Hardjasaputra, 2006]



Gambar 3.2 Potongan A-A [Hardjasaputra, 2006]

Data hasil uji eksperimental, yaitu hasil pembacaan LVDT selengkapnya ditampilkan pada Tabel 3.1, dan hasil pembacaan *strain gauges* selengkapnya ditampilkan pada Tabel 3.2.

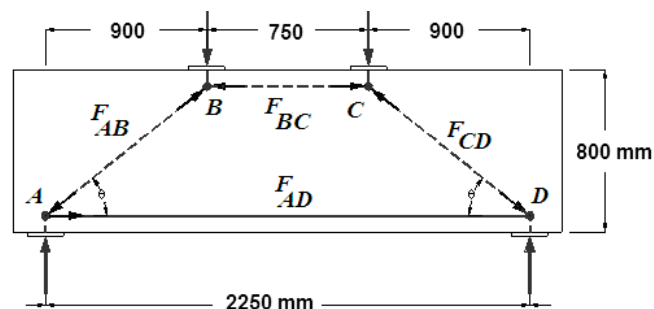


Gambar 3.4 Kurva Hasil Uji Eksperimental [Hardjasaputra, 2006]

3.1 Perhitungan dengan Metode *strut-and-tie model*

Perhitungan dengan metode *strut-and-tie model* dilakukan secara manual berdasarkan persamaan analitis. Tahapan perhitungan meliputi cek kapasitas penunjang (area titik nodal) di daerah pembebanan dan tumpuan, pemilihan model *strut-and-tie* untuk desain, isolasi daerah terganggu (*disturbed region*), pemilihan tulangan, perhitungan *strut* tekan diagonal, dan cek kapasitas, dan penulangan.

Prediksi besar beban ultimit P_u adalah sebesar 568 kN [Hardjasaputra, 2006]. Perhitungan analitis dilakukan tanpa memperhitungkan faktor ϕ , hasil yang diperoleh dibandingkan terhadap hasil uji eksperimental.



Gambar 3.8 Model *Strut-and-tie* untuk Desain.

Perhitungan Kekuatan Area Titik Nodal

Perhitungan kekuatan area titik nodal di lokasi pembebanan ($\beta_n = 1,0$ untuk tipe CCC) dengan Persamaan 2.5.

$$F_{nn} = 0,85 \cdot 1,0 \cdot 37 \cdot 150 \cdot 250 = 1179375 \text{ N} = 1179,375 \text{ kN}$$

Perhitungan kekuatan area titik nodal di lokasi tumpuan ($\beta_n = 0,8$ untuk tipe CCT) dengan Persamaan 2.5.

$$F_{nn} = 0,85 \cdot 0,8 \cdot 37 \cdot 150 \cdot 250 = 943500 \text{ N} = 943,5 \text{ kN}$$

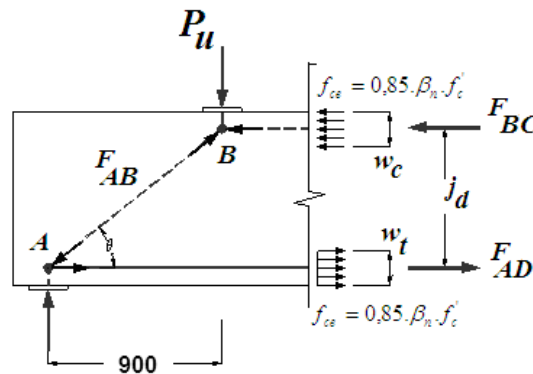
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kekuatan area titik nodal di lokasi pembebanan dan tumpuan lebih besar daripada prediksi beban ultimit.

Perhitungan Kekuatan *Strut* BC dan *Tie* AD

Perhitungan *strut* BC menggunakan Persamaan 2.3 dan *tie* AD menggunakan Persamaan 2.4. Besarnya gaya (beban) terfaktor F_{AD} dan F_{BC} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan keseimbangan momen pada titik A.

$$\sum M_A = 0$$

$$F_{BC} = \frac{511200000}{800 - 1,125 \cdot w_c} \quad (3.1)$$



Gambar 3.9 Perencanaan Kekuatan *Strut* dan *Tie* [Hardjasaputra, 2006]

Besarnya beban terfaktor F_{BC} dihitung sebagai berikut,

$$F_{BC} = \frac{511200000}{800 - 1,125 \cdot w_c} = 743563,64 \text{ N} = 743,56 \text{ kN}$$

$$F_{AD} = F_{BC} = 743,56 \text{ kN}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan cek kapasitas kekuatan *strut* BC dengan Persamaan 2.2.

$$F_{ns} = 0,85 \cdot 1,0 \cdot 37 \cdot (250 \cdot 100) = 786250 \text{ N} = 786,25 \text{ kN}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kekuatan desain *strut* BC (F_{ns}) lebih besar daripada beban terfaktor *strut* BC (F_{BC}).

Sedangkan perhitungan *tie AD* dilakukan menggunakan Persamaan 2.4.

$$F_{ns} = A_{st} \cdot f_y = 1962,5 \cdot 435 = 853687,5 \text{ N} = 853,69 \text{ kN}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kekuatan *tie AD* lebih besar daripada beban terfaktor *tie AD*.

Perhitungan kekuatan *strut AB*

Maka dapat dihitung gaya *strut* tekan diagonal (F_{AB}),

$$F_{AB} = \frac{568000}{\sin 40,675^\circ} = 871477,42 \text{ N} = 871,477 \text{ kN}$$

Lebar *strut* pada bagian atas,

$$w_{ct} = 250 \cdot \sin 40,675^\circ + 100 \cdot \cos 40,675^\circ = 238,784 \text{ mm}$$

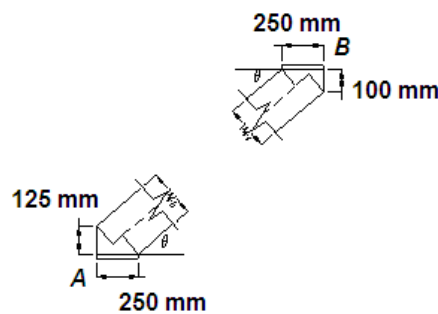
Lebar *strut* pada bagian bawah,

$$w_{cb} = 250 \cdot \sin 40,675^\circ + 125 \cdot \cos 40,675^\circ = 257,74 \text{ mm}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan (cek) kapasitas *strut AB* ($\beta_s = 0,75$),

$$F_{ns} = 0,85 \cdot 0,75 \cdot 37 \cdot (250 \cdot 238,784) = 1408079,4 \text{ N} = 1408,08 \text{ kN}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kekuatan desain *strut AB* lebih besar daripada beban terfaktor *strut AB*.

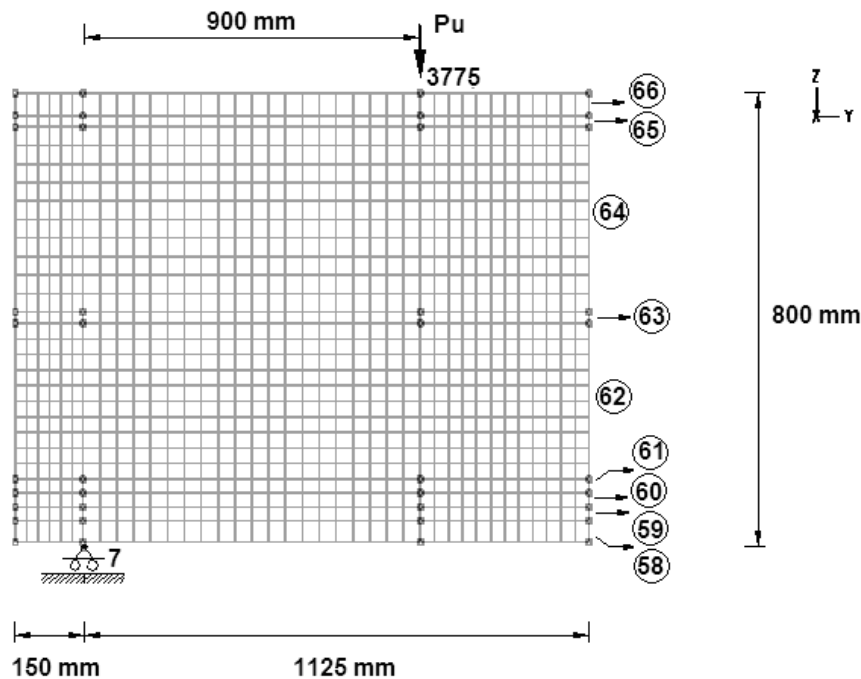


Gambar 3.10 Detail Titik A dan Titik B [Hardjasaputra, 2006]

3.2 Analisis Model Benda Uji dengan Metode Elemen Hingga

Model benda uji mempunyai bentuk simetris, demikian pula dua beban terpusat diletakkan simetris (Gambar 3.1), maka sesuai prinsip simetri struktur [Cook et al., 2004] pemodelan benda uji dibuat setengah bentang pada perangkat lunak *ADINA*. Pemodelan tumpuan benda uji dimodelkan sebagai rol (translasi yang terjadi arah-y dan tidak terjadi

translasi arah-z) pada titik nodal 7. Karena menggunakan prinsip pemodelan simetri struktur, maka pada garis 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66 dimodelkan sebagai tumpuan rol dengan translasi yang terjadi hanya pada arah-z (tidak terjadi translasi arah-y).



Gambar 3.11 Idealisasi Struktur

Pemodelan seperti terlihat pada Gambar 3.11 dilakukan berdasarkan dimensi panjang bentang dan tinggi balok. Untuk menempatkan elemen *truss* sebagai simulasi baja tulangan maka strategi pemodelan dilakukan dengan menggunakan bantuan penempatan objek-objek berupa titik nodal (*node*) dan garis (*line*), dengan jarak disesuaikan berdasarkan detail gambar struktur (Gambar 3.1). Sedangkan pemodelan beton menggunakan objek *surface* dengan elemen *Solid 2D*.

Pemodelan properti material baja, parameter data masukan yaitu nilai modulus elastisitas baja (E) sebesar 200000 MPa dan tegangan leleh baja (f_y) sebesar 435 MPa.

Parameter data masukan pada pemodelan properti material beton perangkat lunak ADINA adalah sebagai berikut:

1. Parameter nilai rasio *Poisson*, pada penelitian ini digunakan $\nu = 0,2$.
2. Parameter uniaksial tekan beton, yaitu:
 - a. Kuat tekan maksimum $f_c' = 37$ MPa

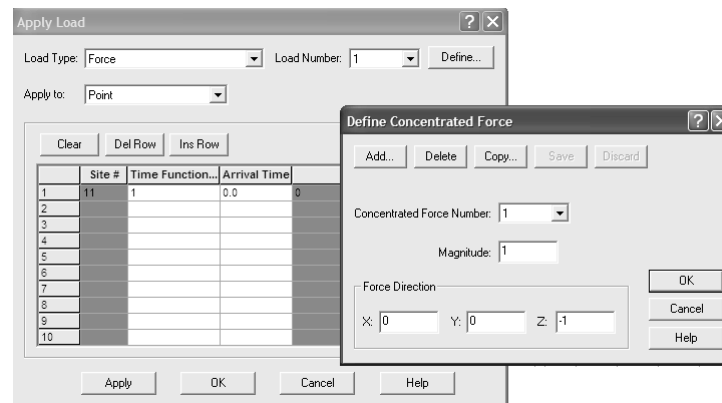
- b. Kuat tekan ultimit [ACI, 2008] yaitu $f_{cu}' = 0,85.f_c' = 31,45$ MPa
- c. Regangan tekan uniaksial $\varepsilon_{cu} = 0,0025$
3. Parameter uniaksial tarik beton, yang berpengaruh pada balok beton bertulang dengan keruntuhan geser. Dalam penelitian ini, nilai *Post Cracking Tensile Stress* (f_{ctp}) nilainya sama dengan nilai *Uniaxial Cut-Off Tensile Stress* (f_{ct}), yaitu dihitung berdasarkan Persamaan 11 [Bresler et al., 1963].

$$f_{ct} = 0,33.\sqrt{f_c'} \quad (3.5)$$

4. Parameter *critical strain constant* C_1 dan C_2 adalah untuk menentukan batas keruntuhan material (*material failure envelopes*) dalam kondisi tegangan multiaksial, yaitu keruntuhan tarik (*tensile*) atau tekan (*crushing*) berdasarkan data uniaksial. Dalam penelitian ini digunakan nilai *default* [ADINA, 2005].

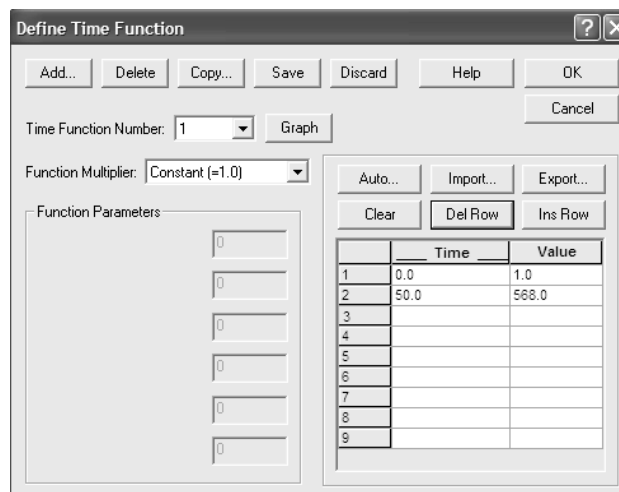
Pemodelan Beban dan Material

Pemodelan beban ditampilkan pada Gambar 3.15. Beban berupa beban terpusat yang ditempatkan pada titik nodal 11 (Gambar 3.11) dengan arah beban yaitu vertikal ke bawah, maka digunakan arah beban sumbu-z negatif.

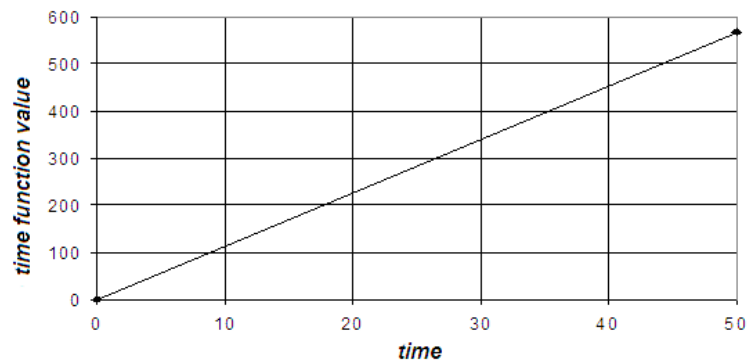


Gambar 3.15 Pemodelan Beban ADINA [ADINA, 2005]

Besarnya beban ultimit (P_u) hasil penelitian Hardjasaputra adalah sebesar 568 kN. Dalam penelitian ini, beban ditingkatkan berdasarkan riwayat waktu pembebanan, dengan tujuan untuk mendapatkan simulasi keruntuhan balok. Oleh karena itu target beban maksimum sebagai parameter data masukan adalah sebesar 568 kN.



Gambar 3.16 Fungsi Waktu Pembebanan [ADINA, 2005]



Gambar 3.17 Kurva Fungsi Waktu

Pemodelan elemen *solid 2D* sebagai data untuk simulasi baja tulangan dan simulasi beton ditampilkan pada Gambar 3.18, untuk baja tulangan digunakan model properti *plastic bilinear* (Gambar 3.14) dan untuk beton digunakan model properti *concrete* (Gambar 3.13). Dalam penelitian ini, asumsi yang digunakan dalam analisis *bond* adalah tidak terjadi slip.

Pembahasan

Dalam penelitian ini pembahasan hasil analisis meliputi peralihan dan regangan arah sumbu-z pada tinjauan beberapa titik, simulasi keruntuhan balok, tegangan pada *strut* diagonal, dan tegangan dan deformasi pada area titik nodal.

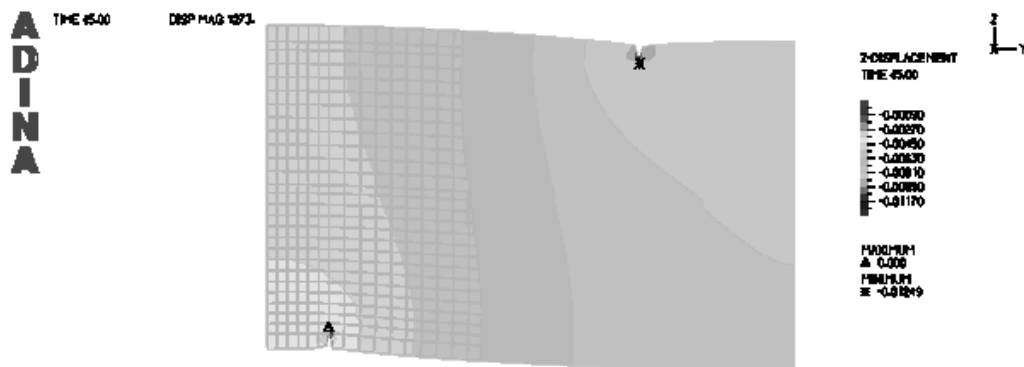
Peralihan yang ditinjau dalam penelitian ini adalah hasil uji eksperimental pada empat lokasi titik pemasangan LVDT yaitu TR4, TR8, dan TR9 (Gambar 3.3 dan data pada

Tabel 3.1), yang selanjutnya dibandingkan terhadap hasil simulasi *ADINA* pada lokasi titik yang sama.

Hasil selengkapnya ditampilkan pada Tabel 3.3. Perbedaan %-relatif antara simulasi *ADINA* terhadap hasil eksperimental berkisar antara 25,49% sampai dengan 27,71%.

Tabel 3.3 Peralihan-z

Eksperimental		<i>ADINA</i>		% -relatif
LVDT	peralihan (mm)	Titik nodal	peralihan (mm)	
TR4	11,055	414	8,051	27,17
TR8	10,800	171	8,047	25,49
TR9	4,320	45	5,517	27,71

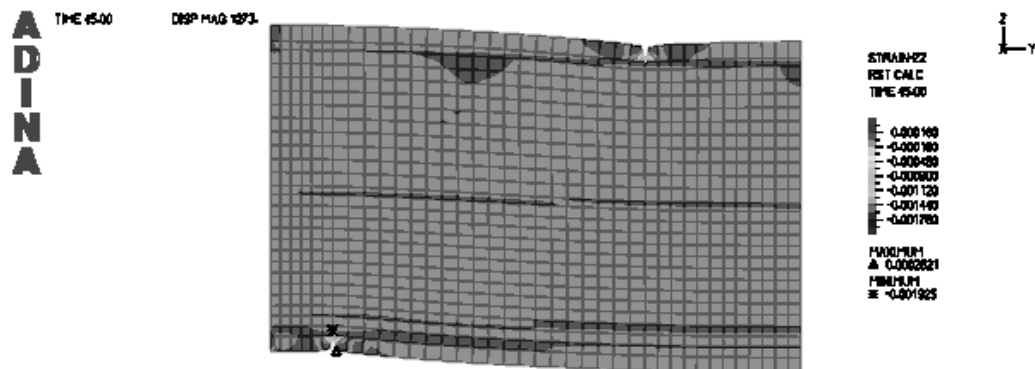


Gambar 3.19 Peralihan Sumbu-z

Hasil simulasi *ADINA* untuk nilai regangan sumbu-z ditinjau elemen 23, 61, 38, dan 76, selanjutnya dibandingkan terhadap hasil uji eksperimental pada lokasi yang sama, yaitu tinjauan *strain gauges* 5, 6, 9, dan 10 berdasarkan data pada Tabel 3.2. Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 3.4. Perbedaan %-relatif antara simulasi *ADINA* terhadap hasil eksperimental berkisar antara 10,53% sampai dengan 17,25%.

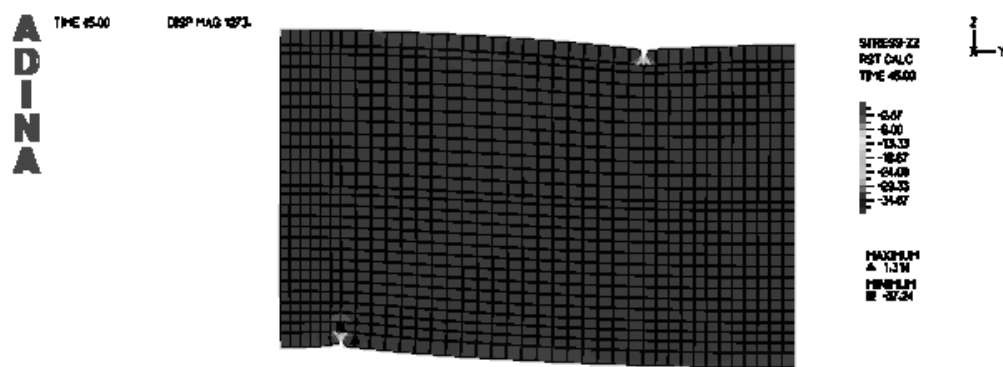
Tabel 3.4 Regangan-z

Eksperimental		<i>ADINA</i>		% -relatif
<i>Strain gauge</i>	regangan	Elemen	regangan	
5	0,003070	61	0,00347	13,03
6	0,001194	23	0,000898	17,25
9	0,000966	76	0,000808	16,36
10	0,000285	38	0,000255	10,53



Gambar 3.20 Regangan sumbu-z

Parameter yang dibutuhkan dalam perencanaan dengan metode *strut-and-tie model* yaitu tegangan maksimum pada *strut* AB. Dari simulasi *ADINA* diperoleh hasil tegangan arah sumbu-z, yaitu pada daerah *strut* diagonal (elemen 862) yaitu sebesar 25,513 MPa. Sedangkan menurut rekomendasi dari Hardjasaputra [Hardjasaputra, 2006] berdasarkan hasil uji eksperimental, besarnya tegangan pada daerah *strut* diagonal yaitu sebesar $0,51f_c'$ (pendekatan dengan Metode ACI 318-2002) atau sebesar 18,87 MPa. Maka perbedaan %-relatif antara hasil simulasi *ADINA* dengan eksperimental adalah sebesar 35,2%.



Gambar 3.22 Tegangan pada *Strut* AB

Sedangkan nilai regangan pada *strut* diagonal AB dengan simulasi *ADINA* diperoleh sebesar 0,000982 mm/mm atau lebih besar 30,93% dibandingkan hasil uji eksperimental Hardjasaputra yaitu 0,00075 mm/mm [Hardjasaputra, 2006].

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Simulasi *ADINA* dapat digunakan untuk memprediksi lendutan balok dengan tingkat ketelitian berkisar antara 25,49%-52,57%. lebih besar dibandingkan hasil eksperimental.
2. Simulasi *ADINA* dapat digunakan untuk memprediksi regangan arah sumbu-z dengan tingkat ketelitian berkisar 10,53%-17,25% lebih besar daripada hasil eksperimental.
3. Penentuan nilai *uniaxial cut-off tensile stress* (f_{ct}) berpengaruh terhadap beban ultimit yang dapat dicapai oleh balok. Hal ini mengindikasikan bahwa besarnya kuat tarik material beton masih mengandalkan rumus empiris berdasarkan dari kuat tekan beton.
4. Untuk mempelajari beban runtuh dari struktur balok beton bertulang maka informasi kurva beban-lendutan selama riwayat pembebanan struktur sangat diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

1. ADINA R&D, Inc. 2005. *ADINA Theory and Modelling Guide, Volume 1*, ADINA R&D, Inc., 71 Elton Ave., Watertown, MA 02472, USA.
2. American Concrete Institute. 2008. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary – An ACI Standard*, American Concrete Institute Committee 318.
3. Bresler. B., Scordelis A.C. 1963. *Shear Strength of Reinforced Concrete Beam*, *Journal American Concrete Institute*, 60(1), 51-72, 1963.
4. Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., Witt, R.J. 2004. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, Inc.
5. Dewobroto, W. 2005. *Simulasi Keruntuhan Balok Beton Tanpa Sengkan dengan Metode Elemen Hingga*, Seminar Bidang Kajian 2, Program Pascasarjana, Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.
6. Harjasaputra, H. 2006. *Consistent Strut-and-Tie Modelling for Full Scale Testing of Three Deep Beams With and Without Opening*, 2nd. Asian Concrete Federation Conference, Bali, Indonesia, November 20-21, 2006.
7. Kwak, H.G., Filippou, F.C. 1990. *Finite Element Analysis Of Reinforced Concrete Structures Under Monotonic Loads*, Report No. UCB/SEMM-90/14, UC-Berkeley, California, 1990.

8. MacGregor, J.G. 2002. *Part 2: Derivation of strut-and-tie models for 2002 ACI Code*, p.7 – 40, in: SP 208 - Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models: K.H. Reineck (Ed.), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
9. Reineck, K.H. 2002. *SP-208: Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 242 pp.
10. Schlaich, J., Schafer, K., Jennewein, M. 1987. *Toward a Consistent Design of Structural Concrete (Special Report)*, PCI Journal, Vol. 32, No. 3, May-June, 178 pp.
11. Standar Nasional Indonesia. 2002. *SNI-03-2847-2002 - Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, Standar Nasional Indonesia.

PENGEMBANGAN SISTEM ELEMEN PENGIKAT UNTUK MENINGKATKAN EFEKTIVITAS KEKANGAN KOLOM BANGUNAN TAHAN GEMPA

Kristianto, A.¹, Imran, I.², Suarjana, M.²

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha
Jalan Prof. drg. Soeria Sumantri, MPH, No. 65, Bandung, 40164
e-mail: anang.kristianto@gmail.com

²Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesa 10, Bandung, 40132

ABSTRAK

Indonesia merupakan daerah rawan gempa, belajar dari kerusakan bangunan yang ditimbulkan oleh kejadian beberapa gempa terakhir dibutuhkan suatu struktur yang benar-benar memenuhi persyaratan sebagai bangunan tahan gempa, baik pada saat perencanaan maupun implementasinya di lapangan. Kolom beton bertulang yang dibangun di daerah resiko gempa tinggi diharapkan mampu untuk bertahan dalam siklus deformasi inelastik dengan tetap memiliki kekuatan dan stabilitas struktur yang memadai. Hal ini dapat terjadi dengan memberikan tulangan pengekang yang tepat pada inti beton elemen struktur kolom. Salah satu persyaratan penting untuk konstruksi tahan gempa yang terkait dengan pendetailan tulangan adalah pemasangan tulangan pengekang dengan kait gempa 135⁰ pada elemen kolom beton bertulang. Pemasangan tulangan pengekang dengan kait 135⁰ tersebut tidaklah mudah. Untuk memudahkan pembuatan dan pemasangannya, banyak pelaksana konstruksi yang pada akhirnya menggunakan tulangan pengekang dengan kait 90⁰. Berdasarkan beberapa hasil penelitian dan beberapa catatan dari kejadian gempa di Indonesia akhir-akhir ini, pemasangan tulangan pengekang dengan kait 90⁰ untuk kolom beton bertulang pada daerah rawan gempa dapat menghasilkan kinerja yang buruk dan berbahaya bagi sistem struktur bangunan secara keseluruhan. Tulisan ini mencoba untuk melakukan pengembangan suatu elemen tambahan yang diharapkan dapat meningkatkan efektivitas kekangan pada kolom dengan kait 90⁰. Elemen tambahan ini dapat ditambahkan dengan mudah dilapangan pada kolom dengan tulangan konvensional yang memiliki kait 90⁰. Penelitian dilakukan melalui serangkaian model finite elemen tulangan pengekang dengan menggunakan software ADINA. Efektivitas penambahan elemen pengikat untuk meningkatkan kinerja pada tulangan konvensional sengkang tertutup 90⁰ serta kait silang akan dianalisis. Penambahan elemen pengikat (pen-binder) cukup efektif untuk meningkatkan kinerja kolom beton bertulang dengan sengkang tertutup 90⁰.

Kata kunci: Kekangan, sengkang pengikat, elemen hingga, efektivitas

ABSTRACT

Indonesia is an earthquake-prone region, learn from the damage of the last earthquake required a structure that truly meet the requirements of earthquake resistant buildings, both at the time of design and implementation in the field. Reinforced concrete columns built in seismically active regions are expected to undergo a large number of inelastic deformation cycles while maintaining overall strength and stability of structure. This can be ensured by proper confinement of the core concrete. One of the important requirements for earthquake resistant building associated with the installation of 135-degree hook-ties in reinforced concrete column elements. Installation of 135-degree hook-ties is not easy, many construction executive used 90-degree hook-ties because of the ease of their placement compared with the 135-degree hook. Based on some research and some

records of earthquakes in Indonesia recently, installation of the 90-degree hook-ties for reinforced concrete columns in earthquake-prone areas can result in poor performance and dangerous for the building system structures. This study tried to develop an additional element that is expected to improve the effectiveness of concrete columns confined with 90-degree hook-ties. Additional element that can be attached on to the conventional 90-degree hook-ties or crossties at the sites. Research conducted through a series of modeling studies with a finite element method using ADINA software. The effectiveness of this additional element in improving the performance of conventional 90-degree hook-ties and crossties in columns was investigated. The pen-binder were found to be effective in improving the performance of concrete column confined with 90-degree hook-ties.

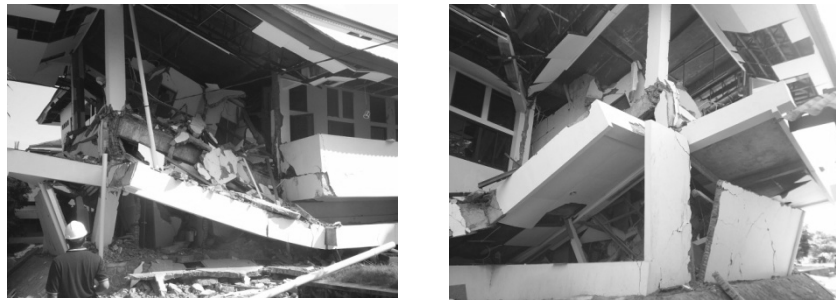
Key words : confinement, hook-ties, finite elements, effectiveness

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki daerah dengan tingkat kerawanan gempa yang tinggi . Hal ini dapat dilihat dengan berbagai kejadian gempa dalam beberapa tahun terakhir yang melanda beberapa daerah di Indonesia (Imran et.al 2006,.Imran et.al.2007). Kondisi ini menyebabkan sistem struktur yang dibangun di Indonesia harus mengikuti kaidah bangunan tahan gempa sehingga pada saat terjadi gempa, struktur dapat bertahan dan melindungi penghuninya dari resiko bahaya gempa.

Namun dalam pelaksanaannya, untuk memenuhi kaidah tersebut tidaklah mudah. Salah satu masalah yang dapat teridentifikasi adalah yang terkait dengan pendetailan tulangan pada struktur bangunan beton bertulang tahan gempa khususnya tulangan pengekanan kolom. Pembuatan dan pemasangan tulangan pengekanan yang benar merupakan suatu keharusan karena hal ini memberikan peranan yang besar agar kolom dapat berperilaku daktail dan memenuhi konsep desain kapasitas. Peraturan perencanaan SNI 03-2847-02 mensyaratkan diberikannya tulangan pengekanan dengan kait gempa 135⁰ pada elemen kolom yang dibangun pada daerah rawan gempa. Dalam prakteknya pembuatan dan pemasangan tulangan pengekanan ini tidaklah mudah, apalagi untuk kolom-kolom berdimensi besar yang umum dipakai pada pada bangunan gedung tinggi seperti apartemen, jembatan dan jalan layang. Untuk memudahkan pembuatan dan pemasangannya, banyak pelaksana konstruksi yang pada akhirnya menggunakan tulangan pengekanan yang dipasang dengan kait 90⁰. Menurut Imran et.al (2006) terkait dengan kerusakan struktur akibat gempa bumi di Indonesia memperlihatkan contoh-contoh keruntuhan bangunan yang terjadi akibat pendetailan tulangan kolom yang tidak memenuhi persyaratan (Gambar 1), hasil penelitian juga membuktikan bahwa pemasangan tulangan pengekanan dengan kait 90⁰ untuk kolom pada daerah rawan gempa dapat menghasilkan kinerja yang buruk dan berbahaya bagi sistem struktur secara keseluruhan.

Oleh karena itu pemasangan tulangan pengekan dengan kait 90° untuk elemen struktur kolom beton bertulang pada dasarnya tidaklah direkomendasikan. Namun, walaupun demikian sistem ini ternyata banyak diaplikasikan di lapangan mengingat kemudahan dalam pemasangannya. Hal ini memotivasi penelitian untuk mengembangkan suatu perangkat tambahan yang dapat memperbaiki kinerja tulangan pengekan yang dipasang dengan kait gempa 90° sedemikian sehingga sekalipun digunakan pengekan dengan kait gempa 90°, struktur kolom yang dihasilkan akan berperilaku daktail dan liat (*tough*), yaitu tidak gampang runtuh.

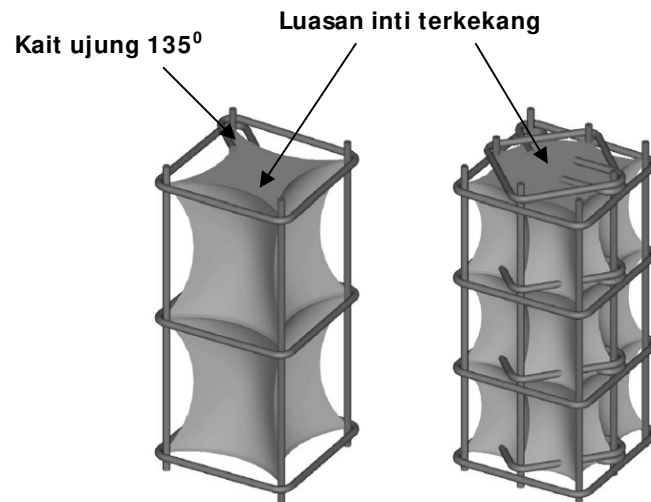


Gambar 1. Contoh Keruntuhan Bangunan akibat Gempa Yogya yang Dipicu oleh Detailing Penulangan Kolom yang Tidak Tepat.(Imran I., 2006)

2. TINJAUAN LITERATUR

Tulangan pengekan pada struktur kolom memiliki fungsi penting yaitu : mencegah menekuknya tulangan longitudinal, mencegah terjadinya keruntuhan geser dan mengekan inti beton sehingga elemen struktur kolom memiliki kemampuan untuk berperilaku daktail pada saat mengalami beban gempa (Paultre P et.al., 2008)

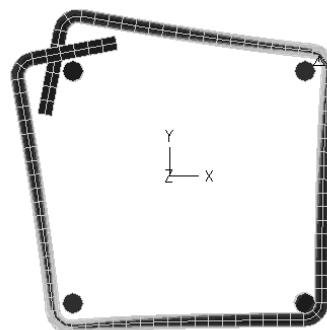
Konsep pemasangan tulangan pengekan pada elemen struktur kolom beton bertulang dimaksudkan agar pada saat selimut kolom terkelupas dan akibatnya luas penampang kolom menjadi berkurang, maka tulangan pengekan diharapkan dapat mengekan inti beton sehingga kolom yang selimutnya telah terkelupas tersebut memiliki kekuatan paling tidak sama dengan kekuatan pada saat selimut kolom belum terkelupas. Akibat kekangan tulangan maka terdapat suatu area yang disebut luasan inti terkekang pada daerah sepanjang kolom. Luasan inti terkekang ini akan dipengaruhi salah satunya oleh konfigurasi tulangan pengekannya (Gambar 2)



Gambar 2. Luasan inti terkekang pada suatu elemen struktur kolom beton bertulang.(Paultre et.al.,2008)

Agar dapat berfungsi dengan baik maka tulangan pengekan ini harus diikat dalam bentuk kait yang mengait pada tulangan longitudinal. Peraturan mensyaratkan untuk daerah rawan gempa tulangan pengekan harus dipasang dengan kait yang ujungnya ditekuk hingga 135^0 seperti terlihat pada gambar diatas. Kait ujung yang ditekuk memiliki panjang sedemikian rupa sampai masuk pada daerah inti terkekang sehingga dapat memberikan tahanan yang baik dan kekangan berfungsi dengan efektif.

Tulangan pengekan dengan kait 90^0 memiliki kemampuan yang lebih rendah dalam menahan inti beton, hal ini terjadi karena tidak ada gaya yang menahan kait tersebut untuk tetap pada posisinya pada saat beban gempa terjadi. Kondisi ini akan mengakibatkan kait membengkok keluar dan tidak efektif lagi mengekan inti beton (Gambar 3)



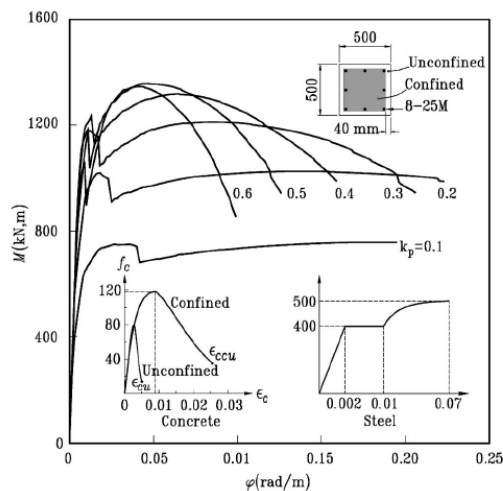
Gambar 3. Kegagalan Kait 90^0 dalam menahan inti beton akibat beban aksial (Output ADINA)

Prinsip penting dalam berbagai penelitian beton terkekang.

Beberapa prinsip penting yang didapat dalam penelitian beton terkekang :

1. Pengaruh Beban Aksial

Semakin tinggi beban aksial akan menurunkan tingkat daktilitas secara signifikan Sheikh dan Yeh 1990, Paultre dan Legeron, 2008 , level beban aksial biasanya diukur dari perbandingan $P/f_c \cdot A_g$ dan P/P_o . (Gambar 4)



Gambar 4. Pengaruh Beban Aksial terhadap daktilitas (Paultre et al., 2008)

2. Konfigurasi Tulangan

Efektifitas kekangan dari tulangan pengekan tergantung dari luas area efektif dari beton yang terkekang dan distribusi tegangan kekangannya, dimana hal ini dipengaruhi oleh distribusi tulangan longitudinal dan lateralnya (Sheikh et al., 1990). Semakin banyak jumlah tulangan longitudinal yang dikekang oleh sengkang, area beton yang terkekang akan meningkat.

3. Batasan Kondisi untuk Konfigurasi Tulangan.

Sheikh dan Khoury (1997) menyarankan bahwa untuk desain beban gempa kolom harus didesain dan didetail dengan level daktilitas tinggi atau moderat. Berdasarkan beberapa eksperimen didapatkan bahwa konfigurasi kategori I tidak dapat digunakan untuk kolom dengan daktilitas tinggi. Pada kolom dengan konfigurasi kategori II, pengujian pada kolom F (Sheikh & Yeh., 1990; Sheikh & Khoury., 1993 ; Sheikh et al., 1994) dengan beban aksial yang tinggi menunjukkan adanya kecenderungan terbukanya sengkang kait 90° pada deformasi yang besar, dan mengakibatkan kolom kehilangan kekangan. Wehbe, Saiidi dan Sanders (1999), dalam pengujiannya terhadap kolom jembatan

berbentuk segiempat yang didesain dalam level moderat menginformasikan bahwa pengekan dengan kait 90^0 pada daerah sendi plastis sudah terbuka dan kondisi ini diikuti dengan menekuknya tulangan longitudinal akibat kehilangan kekuatan kekangan. Sementara pengekan dengan kait 135^0 dalam kondisi mulai akan terbuka diikuti mulai menekuknya tulangan longitudinal pada akhir pengujian.

Lukkunaprasit dan Sittipunt 2003, menambahkan semacam hook-clips pada sambungan antara sengkang kait 90^0 untuk menahan agar kait tidak terbuka. Hook-clips ini dilaporkan efektif mengekan kolom dengan sengkang kait 90^0 yang didesain untuk level gempa moderat serta meningkatkan faktor daktilitas dan energi disipasinya.

Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk level kegempaan yang lebih tinggi bila menggunakan tulangan pengekan dengan kait 90^0 yang diberikan elemen pengikat, mengingat tulangan pengekan yang diberi kait dengan sudut ini lebih praktis dalam pelaksanaannya secara khusus sangat berguna bila diimplementasikan pada kolom jembatan atau bangunan tinggi yang rata-rata berdimensi besar.

Tinjauan Mengenai Pengekan Kolom Beton Bertulang pada Peraturan .

Bila suatu penampang beton bertulang mendekati kekuatan penuhnya sebelum baja leleh, maka penampang tersebut juga mengalami peningkatan deformasi arah aksial maupun lateral sebelum penampang mengalami kehancuran. Untuk memperlambat kehancuran penampang beton maka digunakan tulangan pengekan. Tulangan pengekan dipasang dengan maksud agar pada saat terjadi *spalling* pada pelindung beton, kolom tidak akan kehilangan kekuatan aksialnya.

Kekuatan kolom sebelum selimut terkelupas :

$$P_0 = 0.85 \cdot f_c' \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \quad (1)$$

Kekuatan kolom setelah selimut terkelupas :

$$P_1 = 0.85 \cdot f_1 \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \quad (2)$$

Dimana A_g = luas penampang total, A_{st} = luas total tulangan longitudinal, A_c = luas penampang setelah selimut terkelupas, f_1 = kuat tekan setelah kekangan bekerja, f_y = mutu tulangan *longitudinal*. Sesuai dengan konsep bahwa diharapkan kekuatan kolom minimum sama sebelum dan sesudah selimut lepas maka $P_0 = P_1$. Bila luas tulangan baja A_{st} diabaikan karena terlalu kecil dibandingkan dengan luas penampang kolom maka :

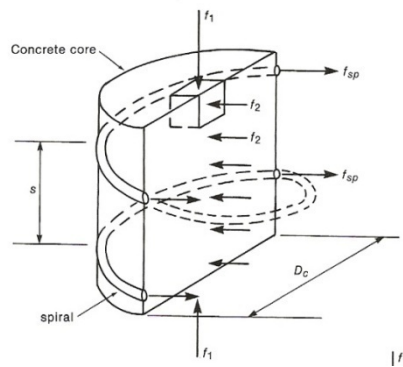
$$f_1 = \frac{A_{st} f_y}{A_g} \quad (3)$$

Berdasarkan penelitian (Richart et.al., 1928) dengan adanya kekangan maka kekuatan tekan inti beton pada kolom akan menjadi sebesar :

$$f_1 = f_c^t + 4.1.f_2 \quad (4)$$

Rasio volumetrik tulangan kekang didefinisikan sebagai perbandingan volume tulangan kekang terhadap volume inti beton, untuk tulangan spiral maka :

$$\rho_s = \frac{A_{sp} s_p}{A_c l_c} = \frac{A_{sp} \pi D_c}{\frac{\pi D_c^2}{4} s} = \frac{4 A_{sp}}{s D_c} \quad (5)$$



Gambar 5. Gaya Pada Beton Terkekang (MacGregor,2005)

Tegangan kekangan (f_2) dihitung dengan asumsi bahwa tulangan kekang telah mencapai tegangan lelehnya (f_y) pada saat kolom mengalami kegagalan. Sesuai dengan keseimbangan freebody (Gambar 5) untuk mendapatkan besarnya tegangan kekang lateral pada inti beton yang dihasilkan oleh pengekangan tulangan, maka jumlah aljabar gaya-gaya tersebut menjadi :

$$f_2 \cdot s \cdot h_u = 2 \cdot A_{sp} \cdot f_{yh} \quad (6)$$

$$f_2 = \frac{2 A_{sp} f_y}{E_u s} = \frac{f_{sp} \rho_s}{2} \quad (7)$$

Sehingga dengan mensubstitusi persamaan diatas maka SNI 03-2847-2002 (pasal 23.4) menetapkan rasio volumetrik minimum tulangan transversal untuk kolom lingkaran sebesar :

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c^t}{f_{yh}} \quad \text{atau} \quad (8)$$

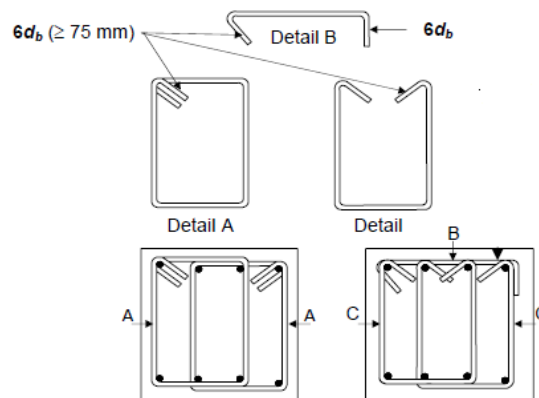
$$\rho_s = 0.12 \cdot \frac{f_c^t}{f_{yh}} \quad (9)$$

Untuk kekangan pada kolom persegi maka sesuai dengan konsep diatas maka persamaan menjadi :

$$A_{sh} = 0.3 \cdot s \cdot h_c \cdot \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \cdot \frac{f_c^t}{f_{yh}} \quad (10)$$

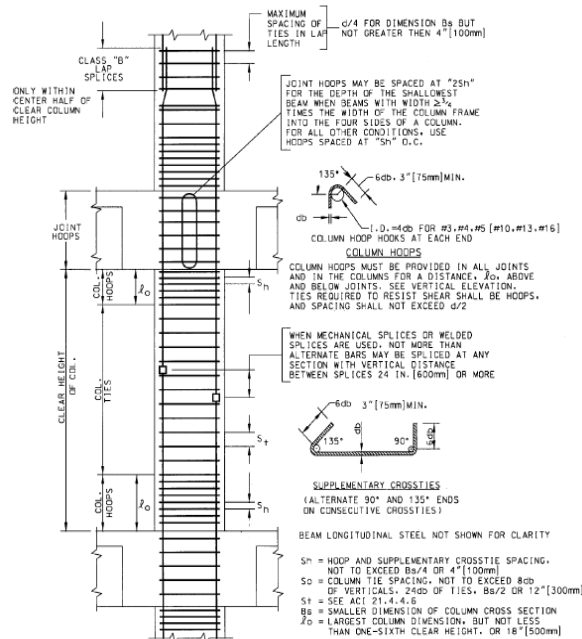
$$A_{sh} = 0.09 \cdot s \cdot h_v \cdot \frac{f_c'}{f_{yh}} \quad (11)$$

Selain persyaratan rasio volumetrik tulangan, peraturan juga memberikan persyaratan kekangan untuk desain elemen kolom pada daerah dengan tingkat kerawanan bahaya gempa yang tinggi. SNI 03-2847-2002 mendefinisikan “ sengkang kait gempa” (seismic hook , Gambar 6) sebagai kait pada sengkang terbuka (Detail-C) , tertutup (Detail-A) atau pada pengikat silang (Detail-B) yang ujungnya ditekuk dengan sudut tidak kurang dari 135°.



Gambar 6. Detail Sengkang Kait Gempa (SNI 03-2847-2002)

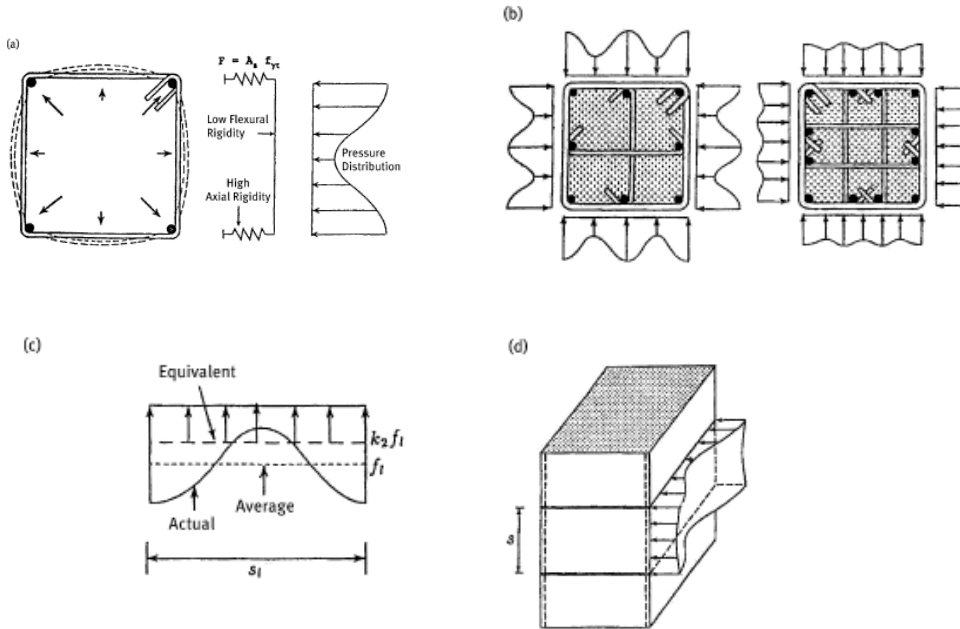
Detailing diperlukan pada daerah-daerah yang diharapkan terbentuk sendi plastis untuk mendisipasi energi gempa yang masuk dalam struktur.(Gambar 7)



Gambar 7. Detailing kekangan pada kolom untuk daerah dengan tingkat kerawanan gempa tinggi (ACI 318M-05)

3. STUDI PEMODELAN TULANGAN PENGEKANG PADA KOLOM

Studi pemodelan tulangan pengekang untuk kolom persegi dilakukan berdasarkan model kekangan yang dikembangkan oleh Saatcioglu M dan Razvi S.R (2002). Seperti terlihat pada gambar 8.



Gambar 8. Tegangan Kekangan pada kolom persegi : a dan b. kolom persegi dengan berbagai konfigurasi, c. Tegangan aktual, rata-rata dan ekuivalen, d. distribusi tegangan sepanjang tinggi kolom. (Saatcioglu M. and Razvi S.R.,2002)

Persamaan berikut mendefinisikan peningkatan kekuatan pada beton terkekang secara analitis sesuai dengan model diatas

$$f_{cc}' = f_{cc}' + k_1 \cdot k_2 \cdot f_l \quad (12)$$

$$f_l = \frac{\sum A_s f_{yh}}{s \cdot b_o} \quad (13)$$

$$k_1 = 6.7(k_2 f_l)^{-0.17} \quad (14)$$

$$k_2 = 0.26 \cdot \sqrt{\frac{b_s}{s} \cdot \frac{b_s}{s_l} \cdot \frac{1}{f_l}} \quad (15)$$

Dimana :

f_{cc}' = Kuat tekan beton terkekang (Mpa)

f_{cc}' = Kuat tekan beton = $0.85f_c'$

f_l = Tegangan yang bekerja pada pengekang lateral (Mpa)

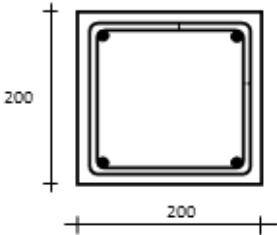
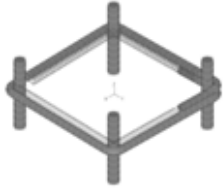
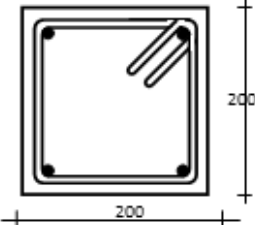

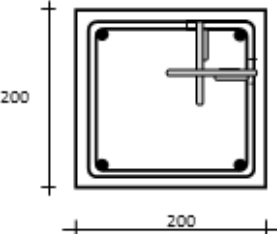
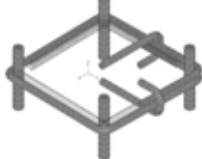

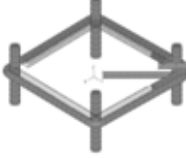
k_1 = koefisien yang menyatakan hubungan antara tegangan pengekang dan peningkatan kekuatan.

k_2 = koefisien yang menyatakan efisiensi tulangan pengekang.

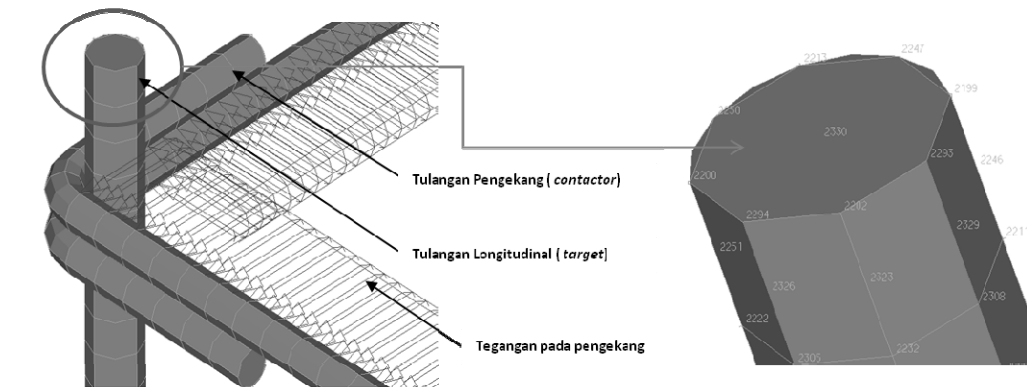
Untuk menganalisis perilaku pengeangan dibuat 5 macam model kolom persegi dengan karakteristik sebagai berikut. Tabel 1. Model kolom dengan dimensi 200mmx200 mm, mutu beton digunakan $f_c'=25\text{Mpa}$, tulangan longitudinal dan pengeang digaanakan diameter 13mm dan 10mm dengan mutu tulangan 400MPa

Sesuai dengan persamaan (12) sampai (15) berdasarkan data pada model kolom diatas didapatkan distribusi tegangan yang bekerja pada kekangan $f_l=1.545\text{ MPa}$, distribusi ekivalen $f_{ekivalen}=k_2.f_l=(0.21).(1.545\text{ MPa})=0.324\text{ MPa}$. Selanjutnya distribusi tegangan dibuat menjadi beban merata yang bekerja pada tulangan pengeang sesuai dengan gambar pada Tabel 1.

Tabel 1. Model Benda Uji

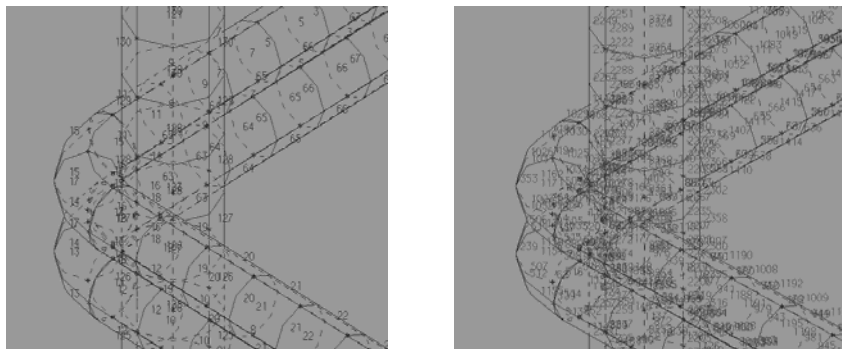
	Type	Model Benda Uji	Finite Elemen Model
A	90-degree hook-ties		
B	135-degree hook-ties		
C	90-degree hook-ties + pen-binder type-1		
D	90-degree hook-ties + pen-binder type-2		
E	90-degree hook-ties + pen-binder type-3		

Pemodelan dan analisis menggunakan software ADINA, salah satu keistimewaan software ini adalah kemampuan untuk menganalisis tegangan kontak antara beberapa elemen struktur dengan karakteristik material yang berbeda. Software ini juga memiliki kemampuan untuk membuat berbagai bentuk model 3 dimensi dengan baik dan cepat serta menghasilkan *output* yang cukup detail.



Gambar 9. Detail model (Input ADINA)

Model A merupakan kolom dengan kait gempu 90° , model B merupakan kolom dengan kait gempu 135° , sedangkan model C,D dan E merupakan kolom dengan kait gempu 90° yang diberikan elemen pengikat (pen-binder) pada bagian tengah, seperempat jarak tulangan longitudinal, dan pada sudut yang terdapat kait 90° . Pemodelan dilakukan dengan menggunakan 3D solid elemen dengan 27 node untuk setiap mesh elemen (Gambar 9 dan 10) dan ukuran mesh yang optimum dibuat untuk mendapatkan data tegangan yang akurat.




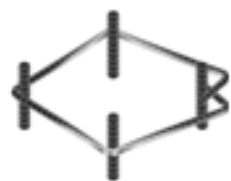


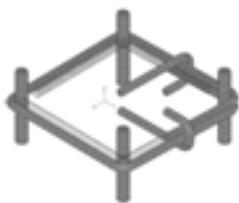
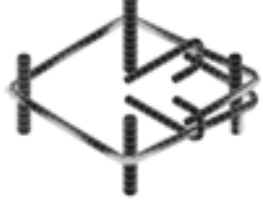

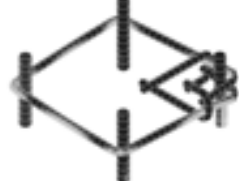

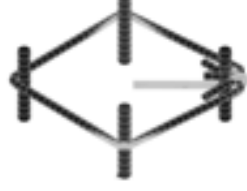
Gambar 10. Penomoran elemen dan nodal

Tulangan longitudinal pada kedua ujungnya dimodelkan sebagai sendi yang tidak dapat bergerak pada arah horisontal, pada ujung bawah dimodelkan tidak dapat bergerak

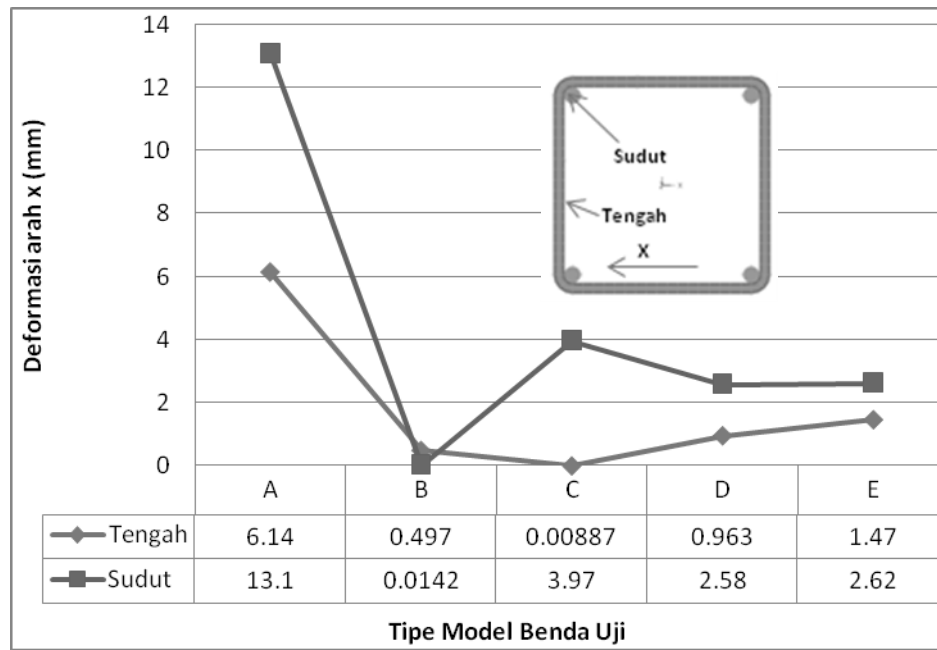
kebawah. Tulangan pengekang dimodelkan sebagai rol yang dapat bergerak pada arah horisontal tetapi tetap pada arah vertikal untuk mendapatkan perilaku deformasi yang terjadi. Pada pertemuan tulangan longitudinal dan tulangan pengekang serta pertemuan tulangan elemen pengikat dan tulangan pengekang dilakukan analisis kontak untuk mendapatkan perilaku pertemuan antara kedua elemen tersebut.

Hasil analisis komputer untuk ketiga pemodelan diatas menghasilkan perilaku deformasi tulangan pengekang seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Deformasi model benda uji.

		<i>Finite Elemen Model</i>	<i>Deformation</i>
A	<i>90-degree hook-ties</i>		
B	<i>135-degree hook-ties</i>		
C	<i>90-degree hook-ties + pen-binder type-1</i>		
D	<i>90-degree hook-ties + pen-binder type-2</i>		
E	<i>90-degree hook-ties + pen-binder type-3</i>		

Pada tabel 2 terlihat bahwa tulangan pengegang dengan kait 90 tanpa penambahan elemen pengikat mengalami deformasi yang cukup besar sehingga tidak efektif mengekang inti beton pada kolom, sementara tulangan pengegang dengan kait 135 derajat memberikan kekangan yang baik.



Gambar 11. Grafik deformasi tulangan pengegang

Gambar 11 memperlihatkan deformasi pada bagian sudut yang terdapat kait 90 dan 135 serta pada bagian tengah diantara dua tulangan longitudinal. Grafik diatas menunjukkan deformasi yang cukup besar terjadi pada model A, sementara model dengan tambahan elemen pengikat (C,D dan E) memperlihatkan deformasi yang relatif lebih kecil yaitu sebesar berturut-turut 30.3%, 19.7% dan 20% dari deformasi model A meskipun belum dapat menyamai model B.

Hasil analisis diatas menunjukkan suatu perbedaan efektivitas pengekangan yang cukup besar antara tulangan pengegang dengan kait 90° dan 135°. Perilaku ini memperkuat pembuktian bahwa kekangan dengan kait 90° tidak cukup efektif untuk memberikan kekangan pada inti beton pada saat kolom mengalami beban gempa. Pemberian elemen pengikat tambahan memberikan hasil yang cukup signifikan dalam memberikan kekangan pada inti beton, hal ini dapat dilihat dari perilaku deformasi ujung kekangan pada model C,D dan E yang relatif jauh lebih kecil daripada model A. Untuk melihat efektivitas kekangan dengan adanya tambahan elemen pengikat perlu dilakukan analisis yang lebih mendalam, komprehensif serta pengujian laboratorium menggunakan benda uji kolom dengan berbagai parameter yang divariasikan.

4. KESIMPULAN

Beberapa hal penting yang dapat disimpulkan dari penelitian pada kasus kolom diatas adalah :

1. Penggunaan tulangan sengkang dengan kait 90° tidak memberikan kekangan yang cukup efektif pada kolom yang dibangun pada daerah rawan gempa
2. Agar dapat berperilaku daktail pada saat mengalami beban gempa diperlukan tulangan pengekan dengan kait 135° karena terbukti efektif mengekan beton pada struktur kolom.
3. Penambahan elemen pengikat pada kekangan dengan kait 90° sedemikian rupa yang tertanam pada daerah inti beton memberikan kekangan yang relatif lebih baik serta cukup signifikan meskipun belum dapat menyamai kolom dengan kait 135° .

5. SARAN

Penelitian mengenai efektivitas pengekan dengan penambahan elemen pengikat ini masih memerlukan studi lanjut dalam analisis numerik elemen hingga maupun pengujian di laboratorium.

Perlunya alternatif bentuk elemen pengikat lainnya sehingga didapatkan bentuk elemen pengikat yang sederhana dan mudah pelaksanaannya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Chen W.F , Lan Y.M., 2006, *Finite Elemen Studi of Confined Concrete*, ACI-Special Publication (SP-238-14).
2. Djauhari Z. , I. Imran., 2008, *Study of Confinement Models for High Strength Concrete Confined by High Strength Steel*, Proceeding International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM '08), Jakarta.
3. Hoedajanto, D., Imran I., 2002, *The Practice of Concrete Engineering in Indonesia*, Proceedings of Asian Concrete Forum Symposium, Seoul, Korea, pp.107-113
4. Imran, I., Suarjana, M., Hoedajanto, D., Soemardi, B., Abduh, M., 2006, *Beberapa Pelajaran dari Gempa Yogyakarta; Tinjauan Kinerja Struktur Bangunan Gedung*, Jurnal HAKI, Vol. 7, No. 1, hal. 1-13 (ISSN No. 0216/5457)
5. Imran, I., 2007, *The 6 March 2007 West Sumatera Earthquake-Lesson Learned and Recommendations*, Prosiding The International Symposium on Disaster in Indonesia (ISDI): Problem and Solution, 26-28 Juli, Padang.
6. Imran, I., Hoedajanto, D., Suharwanto, 2005, *Beberapa Pelajaran dari Gempa Aceh; Tinjauan Kinerja Dua Bangunan Perkantoran di Banda Aceh*, Seminar Gempa HAKI 2005, Jakarta, 25 Mei, (ISBN 979-98441-2-6)

7. Lukkunaprasit, P ; Sittipunt C., 2003, *Ductility Enhancement of Moderately Confined Concrete Tied Column with Hook-Clips* , ACI Structural Journal, V. 100, No. 4, July.-August. 2003, pp. 422-429.
8. Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., 1928. *A study of the failure of concrete under combined compressive stresses*. Engrg. Experiment Station Bull. No. 185, University of Illinois, Urbana, Ill.
9. Saatcioglu M. and Razvi S.R., 2002, Displacement-Based Design of Reinforced Concrete Columns for Confinement, ACI Structural Journal V.99. No1, January-Februari, 2002, pp. 3-11.
10. Paultre P.; Legeron F., 2008, *Confinement Reinforcement Design for Reinforced Concrete Columns*, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol 134. No5 May 2008.
11. Purwono, R., Tavio, Imran, I., Raka, I.G.P, 2006, *Indonesian Concrete Code for Buildings (SNI 03-2847-2002) with Commentary* , ITS Press, Surabaya, Indonesia.
12. Sheikh, S. A., and Yeh, C., 1990, *Tied Concrete Columns under Axial Load and Flexure*, Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 116, No. 10, Oct. 1990, pp. 2780-2800.
13. Wehbe, N. I.; Saiidi M. S.; and Sanders, D. H., 1999, *Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement*, ACI Structural Journal, V. 96, No. 2, Mar.-Apr. 1999, pp. 248-258.
14. Widodo, 2007, *Kerusakan Bangunan Pada Gempa Yogyakarta 27 Mei 2006 Akibat Kebelumjelasan Code, Sosialisasi atau Pelaksanaan ?*, Prosiding Seminar HAKI 2007. Jakarta.

PEDOMAN PENULISAN JURNAL TEKNIK SIPIL UNIVERSITAS KRISTEN MARANATHA

1. Jurnal Teknik Sipil UKM merupakan jurnal ilmiah, hasil penelitian, atau studi literatur disertai analisis ilmiah dalam bidang teknik sipil.
2. Tulisan harus asli dan belum pernah dipublikasikan sebelumnya, dikirim dengan mencantumkan kelompok bidang keahlian dalam teknik sipil.
3. Apabila pernah dipresentasikan dalam seminar, agar diberi keterangan lengkap.
4. Naskah ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris yang benar, singkat, jelas dilengkapi dengan abstrak dan kata kunci dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris.
5. Naskah ditulis pada kertas A4, menggunakan Microsoft® Word dengan ketentuan sebagai berikut :
 - a. Judul ditulis dengan huruf kapital, **TIMES NEW ROMAN**, ukuran 13, huruf tebal.
 - b. Abstrak ditulis dengan huruf biasa, Times New Roman, ukuran 10, spasi 1, demikian juga dengan kata kunci.
 - c. Isi naskah ditulis dengan huruf biasa, Times New Roman, ukuran 11, spasi 1.5.
 - d. Jumlah halaman beserta lampiran minimal 10 halaman, maksimal 20 halaman.
 - e. Jumlah halaman untuk lampiran maksimal 20% dari jumlah halaman total.
 - f. Nama penulis ditulis tanpa pencantuman gelar akademik.
 - g. Penulisan sub bab disertai nomor, contoh :
 - 1. HURUF KAPITAL**
 - 1.1 Huruf Biasa**
 - h. Gambar diberi nomor dan keterangan gambar ditulis dibawah gambar.
 - i. Tabel diberi nomor dan keterangan tabel ditulis diatas tabel.
 - j. Daftar pustaka ditulis dengan format sebagai berikut :
 1. Timoshenko, S.P, Young, D.H., (1995). *Theory of Structures*, McGraw Hill Book Co, New York.
 - k. Kata-kata asing (jika naskah ditulis dalam bahasa Indonesia) dicetak *miring*.
6. Menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut :
 - a. Judul Naskah.
 - b. Nama penulis utama, penulis pembantu.
 - c. Abstrak dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris.
 - d. Kata kunci.
 - e. Pendahuluan (berisi latar belakang, tujuan, ruang lingkup, dan metodologi).
 - f. Isi (tinjauan pustaka).
 - g. Studi Kasus (data, studi kasus, dan pembahasan)
 - h. Penutup (kesimpulan, saran, dan daftar pustaka).
7. Naskah dapat dikirim dalam bentuk cetak di kertas A4 beserta *file* dalam CD-ROM, atau dapat dikirim dalam bentuk *file* via E-mail.
8. Naskah yang masuk redaksi akan ditinjau oleh penelaah ahli dalam bidangnya sebelum diterbitkan.
9. Jurnal terbit 2x dalam setahun pada bulan April dan Oktober.