

Permodelan perilaku daktail balok T pada Beton Mutu Tinggi

¹Ahmad Syaikhani, S.T. ²Darmansyah Tjitradi, S.T., M.T. ³Nursiah Chairunnisa, S.T., M.Eng

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik
Universitas Lambung Mangkurat, Kalimantan Selatan, Indonesia

e-mail: nafissyakhani@yahoo.co.id

ABSTRACT

The use of reinforced concrete beams using a slender and high quality make manufacturing more efficient, but it could be a problem, especially in terms of deflection and torque occurs. Besides the issue of deflection and torsion of reinforced concrete beams are also vulnerable to shear failure, because the beam will suddenly fall without notice. By increasing the volume of concrete, it will increase the ability of beam bending, shear, ductility and strengthen the torsion beam, but if increasing the volume of concrete will increase the cost and increase the space or want a beam to beam slim in terms of aesthetics. This experiment without increasing the volume of concrete but do in the area of compressed concrete curbs and closed.

Experimental models used are high quality concrete T beam with a length of 3.85 m. The number of flexural steel reinforcement 3 pieces with a diameter of 16 mm bending, body reinforcement of 8 mm diameter, 8 mm diameter tensile reinforcement and stirrups of 8 mm diameter (Ramaswamy, 2006). Furthermore, the implementation of a model created in ANSYS with the concrete material was modeled as SOLID 65, Steel material is modeled with SOLID 45, and reinforcing steel were modeled as LINK 8. Then redesign beam experiments with the same capacity so that the beam implementation in detail as reinforced concrete beams with a span length profiles T (L) 3.85 m, height (h) 350 mm, web beam width (bw) 150 mm, effective flens width (be) 375 mm, 450 mm and 600 mm. Beam profile T design used double the number of reinforcement rebars press 6 pieces of 10 mm diameter, reinforced pull 3 pieces of 22 mm diameter, and stirrups were used diameter of 10 mm. The quality of concrete used (f_c') = 65 MPa. Flexural yield stress and tensile steel reinforcement is used (f_y) = 400 MPa and reinforcement steel stirrups used (f_y) = 240 MPa. Analysis of the modeling is done using the finite element method with a variation of the cross bar spacing of 50 mm, 75 mm, and 100 mm.

The results showed that the load at the first crack that can be accepted on a concrete T beams with increasingly high quality meeting the local press stirrup spacing increased (but less significant influence). Then when the ultimate load on the beam can be accepted T on high strength concrete with closed the local press stirrup spacing increased (significant influence). Sengkang also affect the crack, the closer the distance stirrup in the press area will strengthen the concrete and reduce the widening cracks, as seen at the time of the first concrete crack and crack mangalami ultimate. While the effective width also affected, the greater the effective width of high strength concrete T beams will increase the moment capable of being held, so that the beam is getting stronger and greater ductility.

Keywords : T Beam, Reinforcement of Cross Bar, Bending Capacity, Fracture Behavior, Pattern Collapse and Ductility.

ABSTRAK

Pemakaian balok beton bertulang yang ramping dan menggunakan mutu tinggi menjadikan pembuatan lebih efisien, namun bisa menjadi masalah terutama dalam hal lendutan dan torsi yang terjadi. Selain masalah lendutan dan torsi balok beton bertulang juga rawan terhadap keruntuhan geser, karena balok akan tiba-tiba jatuh tanpa pemberitahuan. Dengan memperbesar volume beton maka akan menambah kemampuan lentur balok, geser, daktilitas dan memperkuat balok terhadap torsi, namun jika menambah volume beton akan menambah biaya yang besar dan menambah ruang untuk balok atau menginginkan balok yang ramping dalam segi estetika. Bagaimana jika tanpa menambah volume beton namun melakukan pengeangan beton pada daerah tekannya dan merapatkannya.

Model eksperimental yang digunakan adalah balok T beton mutu tinggi dengan panjang 3,85 m. Jumlah tulangan lentur 3 buah dengan diameter tulangan lentur 16 mm, diameter tulangan badan 8 mm, diameter tulangan tarik 8 mm dan diameter sengkang 8 mm (Ananth Ramaswamy, 2006). Selanjutnya dibuat model implementasi pada ANSYS dengan material beton dimodelkan sebagai SOLID 65, material baja dimodelkan dengan SOLID 45, dan tulangan baja dimodelkan sebagai LINK 8. Kemudian mendesain ulang balok eksperimen dengan kapasitas yang sama sehingga balok implementasi secara rinci sebagai balok beton bertulang profil T dengan panjang bentang (L) 3,85 m, tinggi (h) 350 mm, lebar balok (bw) 150 mm, lebar efektif flens (be) 375 mm, 450 mm dan 600 mm. Balok Profil T desain digunakan tulangan rangkap dengan jumlah tulangan tekan 6 buah diameter 10 mm, tulangan tarik 3 buah diameter 22 mm, dan sengkang yang digunakan diameter 10 mm. Mutu beton yang digunakan (f_c') = 65 MPa. Tegangan leleh tulangan lentur dan tarik baja yang digunakan (f_y) = 400 MPa dan tulangan sengkang baja yang digunakan (f_y) = 240 MPa. Analisis pada permodelan dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan variasi jarak sengkang 50 mm, 75 mm, dan 100 mm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban pada saat retak pertama yang mampu diterima balok T pada beton mutu tinggi dengan semakin rapatnya jarak sengkang pada daerah tekan semakin meningkat (namun kurang signifikan pengaruhnya). Kemudian Beban pada saat ultimit yang mampu diterima balok T pada beton mutu tinggi dengan rapatnya jarak sengkang pada daerah tekan semakin meningkat (sangat signifikan pengaruhnya). Sengkang juga berpengaruh terhadap retak, dengan semakin rapat jarak sengkang pada daerah tekan maka akan memperkuat beton dan mengurangi pelebaran retak, hal ini terlihat pada saat beton mengalami retak pertama dan retak ultimit. Sedangkan lebar efektif juga berpengaruh, semakin besar lebar efektif balok T beton mutu tinggi maka akan semakin meningkat momen yang mampu ditahan, sehingga balok semakin kuat dan daktilitasnya semakin besar.

Kata Kunci: Balok T, Penulangan Sengkang, Kapasitas Lentur, Perilaku Retak, Pola Keruntuhan dan Daktilitas.

I. PENDAHULUAN

Pemakaian balok beton bertulang yang ramping dan menggunakan mutu tinggi menjadikan pembuatan lebih efisien, namun bisa menjadi masalah terutama dalam hal lendutan dan torsi yang terjadi. Selain masalah lendutan dan torsi balok beton bertulang juga rawan terhadap keruntuhan geser, karena balok akan tiba-tiba runtuh tanpa pemberitahuan. Balok beton bertulang harus didesain mengalami keruntuhan tarik, dengan tulangan baja tarik leleh terlebih dahulu, jangan sampai terjadi keruntuhan tekan atau geser yang sifatnya mendadak (brittle), sehingga korban jiwa dapat dihindari. Salah satu cara menghindari keruntuhan yang mendadak adalah dengan melakukan pengeangan pada inti beton.

Dengan memperbesar volume beton maka akan menambah kemampuan lentur balok, geser, dan memperkuat balok terhadap torsi, namun jika menambah volume beton akan menambah biaya

yang besar dan menambah ruang untuk balok atau menginginkan balok yang ramping dalam segi estetika. Penelitian ini akan mencoba memodelkan balok T (mengurangi volume beton) yang divariasikan jarak tulangan geser pada daerah tekannya (pengekangan). Peran tulangan geser dalam daktilitas balok T beton mutu tinggi serta pola keruntuhan yang terjadi merupakan hal penting untuk diteliti.

Tujuan Penelitian ini adalah mengetahui beban pada saat retak pertama yang mampu diterima balok T pada beton mutu tinggi, mengetahui beban saat ultimit yang diterima balok T beton mutu tinggi, mengetahui daktilitas kurvatur balok T pada beton mutu tinggi, mengetahui perilaku retak balok T pada beton mutu tinggi dengan variasi lebar efektif dan mengetahui akibat pengaruh pengekangan dengan variasi jarak sengkang pada daerah tekan.

Manfaat yang diberikan dari penelitian ini yaitu manfaat praktis bagi industri ialah memberikan desain balok T yang efisien dalam pemakaian tulangan sengkang beton, kemudian manfaat bagi keilmuan rekayasa struktur ialah memberikan informasi jarak sengkang minimum yang mewakili nilai daktilitas kurvatur Balok T pada beton mutu tinggi.

II. METODE PENELITIAN

Balok T yang digunakan pada penelitian ini menggunakan beton mutu tinggi (>50 MPa) dan dianalisa menggunakan metode elemen hingga dengan permodelan menggunakan software ANSYS.

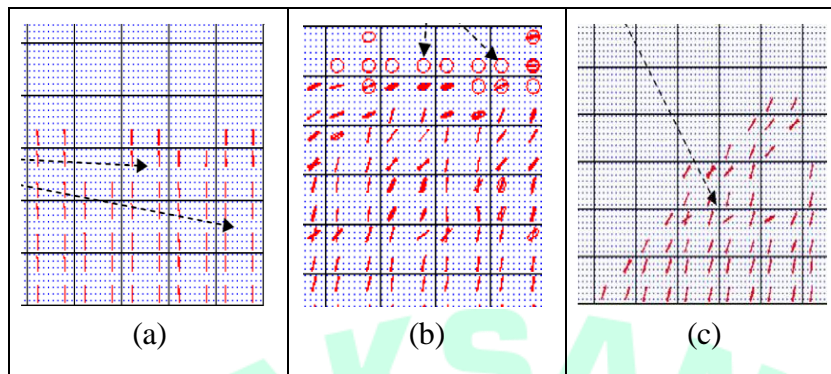
2.1 Permodelan pada ANSYS

Penelitian beton menggunakan software ANSYS dan perhitungan manual telah banyak dilakukan karena memberikan keuntungan dan kemudahan dalam pengerjaan, juga tidak memakai biaya yang banyak dibandingkan dengan uji di laboratorium. Sedangkan dari segi hasil menunjukkan hasil yang hampir serupa.

2.1.1 Permodelan Material Beton

Material beton didefinisikan oleh delapan titik dan memiliki sifat material *isotropic*. Elemen ini mampu menggambarkan perilaku retak pada tiga arah ortogonal, mengalami hancur, deformasi plastis dan rangkai dari beton. *Input* data material model *concrete SOLID65* yaitu kuat tekan beton (f_c') = 65 MPa, modulus elastisitas beton (E_c) = 33.667 MPa, *poisson* rasio untuk beton digunakan 0,20, kuat tarik beton (f_t) = 7,579 ($0,94 \cdot \sqrt{f_c'}$), nilai tegangan-regangan hasil perhitungan model Almussalam dan Alsayed (1995) dimasukkan kedalam *multilinier isotropic hardening plasticity*. Perilaku *elastic isotropic* pada beton terjadi pada saat sebelum beton mengalami retak awal atau posisi akan mengalami kehancuran awal. Kemudian parameter kegagalan pada permukaan beton dalam ANSYS dimodelkan dalam lima pada *nonlinier nonmetal plasticity concrete*, yaitu:

Concrete material data	
ShrCf-Op	0,2
ShrCf-Cl	1
UnTensSt	7,579 ($0,94 \cdot \sqrt{f_c'}$)
UnCompSt	65 (f_c')
BiCompSt	0

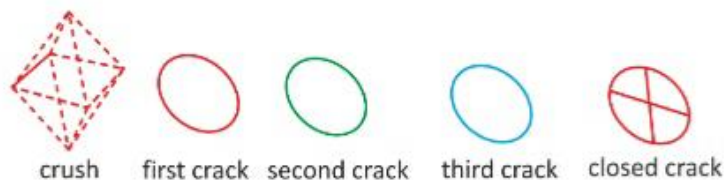


(a) Retak lentur (b) Retak tekan (c) Retak geser

Gambar 2 Pola Retak yang Terjadi pada ANSYS (Parvanova, 2004)

Retak lentur pada ansys disimbolkan dengan garis vertikal, sedangkan retak geser disimbolkan dengan garis diagonal. Jika terdapat dua buah garis (vertikal dan diagonal) maka retak tersebut disebut retak geser lentur yaitu retak geser dan lentur sekaligus. Kemudian terdapat simbol bulat artinya beton mengalami tekan. Jika retak semakin banyak dan bertumpuk pada suatu titik, retak geser lentur kemudian tekan maka beton tersebut berarti sudah pecah mendekati ultimit.

Pola retak hasil ANSYS Ed. 9.0 pada elemen Solid65 keruntuhan tekan biasanya terjadi pada elemen struktur yang mengalami gaya tekan seperti kolom atau pada tumpuan balok, yang berbentuk bulatan dengan urutan retak, retak pertama lingkaran berwarna merah, retak kedua lingkaran berwarna hijau dan retak ketiga lingkaran berwarna biru. Selain itu untuk retak tertutup ditunjukkan dengan simbol bulat bergaris vertikal dan horizontal sedangkan retak crushing ditunjukkan dengan simbol segitiga, dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 3 Pola Retak (German, 2004)

2.2 Daktilitas Struktur

Daktilitas adalah sifat penting yang harus dimiliki struktur yang harus merespon inelastisitas pada gempa bumi yang besar. Sifat ini diukur dari regangan, peralihan dan rotasi. Daktilitas yang besar memungkinkan suatu komponen struktur atau suatu joint menahan regangan plastis tanpa mengalami reduksi tegangan yang signifikan. Jadi, rotasi-rotasi yang besar harus betul-betul diperhatikan sebagai ukuran kelengkungan, apabila diskontinuitas, peralihan yang tidak dapat ditahan, atau raptor ingin dihindari. Tiga jenis daktilitas (Nawy, 2001) adalah

1. Daktilitas Regangan
2. Daktilitas Kelengkungan
3. Daktilitas Peralihan

Daktilitas kelengkungan/daktilitas kurvatur (*curvature ductility*), yaitu perbandingan antara sudut kelengkungan (*angle of curvature*) maksimum pada saat ultimit dan sudut kelengkungan pada saat terjadi leleh pertama pada tulangan tarik dari suatu elemen struktur akibat beban momen lentur.

$$\mu_{\varphi} = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} \quad (2.1)$$

dimana μ_{φ} = daktilitas kurvatur,

φ_u = kurvatur ultimit (rad/satuan panjang), dan

φ_y = kurvatur leleh (rad/satuan panjang).

Model penelitian ini berupa balok T beton mutu tinggi, balok berada pada dua tumpuan biasa dengan beban dua titik pada tengah bentang. Dengan beban dua titik pada tengah bentang maka balok hanya mengalami keruntuhan lentur akibat momen tanpa adanya gaya lintang yang mempengaruhi. Balok kemudian didesain mengalami keruntuhan lentur sehingga dapat diamati pengaruh tulangan geser pada balok, khususnya bagian tengah balok. Berdasarkan kategori keruntuhan balok maka persyaratan balok mengalami keruntuhan seimbang (kekuatan gesernya sama dengan kapasitas keretakan miring, lentur mulai bersifat dominan), yaitu $2 \frac{1}{2} < a/d < 6$, sebagai balok pendek dimana a =jarak beban ke perletakkan dan d =jarak tulangan tarik ke serat tekan balok. Dengan tinggi balok $d = 304$ mm, maka jarak ujung balok ke perletakkan = 1500 mm.

Faktor lain yang sangat berpengaruh terhadap daktilitas ialah kekuatan daerah tarik, caranya bisa menambah tulangan tarik atau menambah lebar efektif balok (B_e). Pada penelitian ini divariasikan lebar efektif balok T sehingga dapat mengetahui peningkatan lebar efektif terhadap daktilitas balok. Variasi lebar efektif yang digunakan yaitu 375 mm (lebar efektif balok eksperimen), 450 mm (3. b_w), dan 600 mm (4. b_w).

Untuk mencegah pecahnya beton di tengah bentang maka juga diperlukan tulangan geser ditengah sepanjang $2h$. Diameter sengkang yang digunakan pada balok implementasi sebesar 10 mm. Jarak sengkang yang digunakan bervariasi yaitu $1/3.b_w$, $2/3.b_w$ dan b_w . Perilaku daktil balok T beton mutu tinggi akibat variasi jarak tulangan sengkang dapat dilihat pada penelitian ini.

Spesifikasi model sebagai berikut:

1. Analisis pada permodelan dilakukan menggunakan metode elemen hingga.
2. Balok berupa beton bertulang profil T seperti pada Gambar 1.2 dengan panjang bentang (L) 3,85 m, tinggi (h) 350 mm, lebar (b_w) 150 mm, lebar (b_e) 375 mm, 450 mm dan 600 mm.
3. Diameter sengkang yang digunakan 10 mm untuk dengan variasi jarak sengkang 50 mm, 100 mm, dan 150 mm.
4. Balok Profil T desain digunakan tulangan rangkap dengan jumlah tulangan tekan 6 buah diameter 10 mm dan tulangan tarik tiga buah diameter 22 mm.
5. Mutu beton yang digunakan (f_c') = 65 MPa.
6. Tegangan leleh tulangan lentur dan tarik baja yang digunakan (f_y) = 400 MPa dan tulangan sengkang baja yang digunakan (f_y) = 240 MPa.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji eksperimen yang dilakukan Ananth Ramaswamy adalah balok T beton mutu tinggi dengan panjang 3,85 m. Jumlah tulangan lentur tiga buah dengan diameter tulangan lentur 16 mm, diameter tulangan badan 8 mm, diameter tulangan tarik 8 mm dan diameter sengkang 8 mm. Perbandingan beban retak dan beban ultimit hasil uji eksperimental, finite element analysis ANSYS, dan perhitungan manual untuk balok validasi dengan seri BEV dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai Beban Balok Validasi

Beban	Eksperimental	ANSYS	Analisis
P_{cr} (kN)	81,45	52,79	48,27
P_u (kN)	234,40	278,59	135,87

Tabel 1 menunjukkan pada saat retak pertama nilai beban hasil ANSYS berada di antara nilai beban eksperimental dan hasil analisis kemudian pada saat ultimit nilai beban hasil ANSYS mendekati hasil eksperimental. Nilai rasio beban hasil eksperimental dan hasil ANSYS untuk beban retak adalah 0,65 dan untuk beban ultimit sebesar 1,19. Adapun mengenai pola retak menunjukkan hasil yang hampir serupa antara balok eksperimen dan hasil ANSYS.

Hasil Analisis jika memperbesar lebar efektif balok T beton mutu tinggi sebesar 20 persen maka akan menambah kekuatan balok beton sebesar (4 s/d 8) persen dan jika memperbesar lebar efektif balok T beton mutu tinggi sebesar 60 persen maka akan menambah kekuatan balok beton sebesar (9 s/d 50) persen. Kemudian dengan merapatkan tulangan sengkang balok T beton mutu tinggi pada daerah tekan menjadi (100 s/d 150) mm akan menambah kekuatan balok beton sebesar (1 s/d 5) persen dan dengan merapatkan tulangan sengkang balok T mutu tinggi pada daerah tekan menjadi 50 mm akan menambah kekuatan balok beton sebesar 40 persen. Dengan menambah lebar efektif balok beton berarti akan memerlukan biaya yang besar dibandingkan menambah tulangan sengkang pada daerah tekan.

Tabel 2 Daktilitas Kurvatur Balok Implementasi

Kode Balok	ANSYS 9.0			Manual			Keterangan
	Kurvatur Leleh	Kurvatur Ultimit	Daktilitas Kurvatur	Kurvatur Leleh	Kurvatur Ultimit	Daktilitas Kurvatur	
ASBT1-50	0,00111	0,01009	9,090	0,002	0,0235	8,735	Beban Gempa Ringan
ASBT1-100	0,00123	0,00949	7,715	0,002	0,0235	8,735	Beban Gempa Ringan
ASBT1-150	0,00111	0,01209	10,892	0,002	0,0235	8,735	Beban Gempa Ringan
ASBT2-50	0,00096	0,01022	10,645	0,0025	0,0282	11,085	Beban Gempa Ringan
ASBT2-100	0,00117	0,01008	8,615	0,0025	0,0282	11,085	Beban Gempa Ringan
ASBT2-150	0,00117	0,01010	8,632	0,0025	0,0282	11,085	Beban Gempa Ringan
ASBT3-50	0,00110	0,01503	13,664	0,0024	0,0376	15,775	Beban Gempa Sedang
ASBT3-100	0,00105	0,00970	9,238	0,0024	0,0376	15,775	Beban Gempa Ringan
ASBT3-150	0,00109	0,00978	8,972	0,0024	0,0376	15,775	Beban Gempa Ringan

Dari Tabel 2 dapat diambil kesimpulan semakin rapat jarak sengkang pada daerah tekan maka akan meningkatkan daktilitas beton. Peran tulangan sengkang pada daerah tekan terlihat

pada beton sebelum mengalami runtuh, dengan adanya tulangan sengkang pada serat tekan akan menambah daktilitas beton sehingga akan lambat runtuh. Untuk balok ASBT1 dan ASBT2 balok digunakan dengan pengaruh beban gravitasi dan balok ASBT3 bisa digunakan dengan pengaruh beban gempa ringan dan beban gempa sedang. Kemudian dapat dilihat bahwa penambahan lebar efektif balok dapat meningkatkan daktilitas.

Dari data hasil penelitian dapat diketahui pengeangan terbaik adalah pada balok ASBT3-50 dengan merapatkan tulangan sengkang dengan jarak spasi sebesar $1/3 b_w$ pada daerah tekan dan memperbesar lebar efektif menjadi sebesar 4 kali lebar balok ($b_e = 4.b_w$). Jika $b_e = 800$ mm maka $b_w = b_e/4 = 200$ mm dan jarak pengeangan = 66,67 mm. Sedangkan spasi harus kurang dari atau sama dengan $1/12$ dari lebar efektif flens ($S \leq \frac{1}{12} .b_e$).

IV. KESIMPULAN (12 pt bold)

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Beban pada saat retak pertama yang mampu diterima balok T pada beton mutu tinggi dengan semakin rapatnya jarak sengkang pada daerah tekan semakin meningkat (namun kurang signifikan pengaruhnya).
2. Beban pada saat ultimit yang mampu diterima balok T pada beton mutu tinggi dengan rapatnya jarak sengkang pada daerah tekan semakin meningkat (sangat signifikan pengaruhnya).
3. Semakin besar lebar efektif balok T beton mutu tinggi maka akan semakin meningkat momen yang mampu ditahan, sehingga balok semakin kuat dan daktilitasnya semakin besar.
4. Dengan semakin rapat jarak sengkang pada daerah tekan maka akan memperkuat beton dan mengurangi pelebaran retak, hal ini terlihat pada saat beton mengalami retak pertama dan retak ultimit.
5. Semakin rapat jarak sengkang pada daerah tekan maka akan meningkatkan daktilitas beton. Peran tulangan sengkang pada daerah tekan terlihat pada beton sebelum mengalami runtuh, dengan adanya tulangan sengkang pada serat tekan akan menambah daktilitas beton sehingga akan lambat runtuh.

DAFTAR PUSTAKA

- Almussallam, T. H., and Alsayed S. H. (1995). Stress-Strain Relationship of Normal, High Strength and Light Weight Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 47, No. 170, pp 39-44.
- ANSYS, Release 9.0. (2007). *Programmer's Manual for ANSYS Incorporations and ANSYS Europe*, Ltd. (<http://ansys.com>).
- German, D. (2004). *Seismic Behavior of Composite wall systems Subjeesed to different Levels of seismic Action and with different Levels of protection*, Master Thesis.
- Kosasih, Prabuono Buyung. (2012). *Teori dan Aplikasi Metode Elemen Hingga*. Yogyakarta: CV. Andi.
- MacGregor, J.G. (1997). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design 3rd Ed.* ". Prentice-Hall International, Inc. <http://www.gussuta.com/teknik/perpustakaan-teknik-sipil.html>
- Maghsoudi, K. Masti A.A and Rahgozar R. (2008). *Nonlinear Model and Experimental Investigation of LifetimeHistory of HSC Flexural Beams*. University of Kerman. Kerman.
- McCormac, Jack C. (2000). *Desain Beton Bertulang*. Jakarta: Erlangga.
- Park, R, Paulay T. (1974). *Reinforced Concrete Design*". New York: John Wiley & Son.
- Parvanova, Sonia. L., et al. (2004). *Modeling The Nonlinear Behaviour of R/C Beams With Moderate Shear Span and Without Stirrups Using Ansys*. Bulgaria: National Science Fund.

- Purwono, Rachmat, dkk. (2007). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002)*. Surabaya: ITS Press.
- Soehartono. (2004). *Studi Eksperimental mengenai Efektifitas Kekangan Tulangan Lateral pada Beton Penampang Persegi*. Tesis Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro. Semarang.
- Supartono, F.X. (1998). *Mengenal dan mengetahui permasalahan pada produksi beton berkinerja tinggi*. artikel ilmiah. UI. Jakarta.
- Thomas, J and Ramaswamy, A. (2006). *Shear Strength of Partially Prestressed Concrete T-Beams with Steel Fibers in Partial/Full Depth*. *ACI Structural Journal*, 103(3). 427-435.
- Tjitradi, D. (2009). *Modul Beton Daktilitas Kurvatur Balok Bertulangan Tunggal Beton Mutu Normal (Kondisi Unconfined)*. Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat.
- Tjitradi, D. (2009). *Modul Beton Lentur pada Balok T dan L (Tulangan Tunggal)*. Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat.
- Zhenhua, Wu. (2006). *Behaviour of High-Strength Concrete Members Under Pure Flexure and Axial-Flexural Loadings*. Dissertation Civil Engineering North Carolina State University. Raleigh, North Carolina.

