

KAJIAN KARAKTERISTIK DAN DESAIN KAPASITAS LENTUR PADA BETON MUTU TINGGI

Eliatun¹, Darmansyah Tjitradi²

*Universitas Lambung Mangkurat^{1,2}
eliatun_tarip@yahoo.com¹
tjitradi_syah@yahoo.com²*

ABSTRACT

The world of construction is rapidly developing, and the more advanced the technology is the more use of high-strength concrete will be found. Through this literature review the characteristics and the concept of high-strength concrete flexural capacity design can be studied, and that includes physical and mechanical properties that can be used as the basis in the applications of high-strength concrete as a material for construction. In Indonesia, the SNI 03-2847-2002 standards only regulate the use of normal-strength concrete and have not covered issues related to high-strength one.

This is important since in Indonesia high-strength concrete has been used as structural material. Hence, better knowledge regarding high-strength concrete is needed to ensure the conformity between the design and the structural requirements.

By comparing SNI 03-2847-2002 standards with those from several other countries using flexural capacity analysis on high-strength concrete, it is found that the SNI 03-2847-2002 standards can still be used in the design of cross sections of high-strength concrete.

Keywords: *high strength concrete*

ABSTRAK

Dunia konstruksi dewasa ini sudah sangat maju sekali, semakin maju teknologi dibidang konstruksi semakin banyak penggunaan beton mutu tinggi. Melalui kajian pustaka ini dapat dipelajari karakteristik dan konsep desain kapasitas lentur beton mutu tinggi yang meliputi sifat-sifat fisik, dan mekanik yang dapat digunakan sebagai dasar dalam pemakaian beton mutu tinggi sebagai suatu bahan konstruksi.

Di Indonesia SNI 03-2847-2002 hanya mengatur mengenai penggunaan beton mutu normal namun masih belum mengatur mengenai hal-hal yang berkenaan dengan beton mutu tinggi. Hal ini sangat penting sekali karena di Indonesia penggunaan beton mutu tinggi sudah mulai dipakai sebagai bahan struktur. Untuk itu diperlukan pengetahuan yang lebih baik mengenai karakteristik beton mutu tinggi untuk menjamin kesesuaian di antara desain dan persyaratan-persyaratan struktur.

Dengan membandingkan analisis kapasitas lentur menurut peraturan SNI 03-2847-2002 dengan beberapa negara lain yang menggunakan analisis kapasitas lentur beton mutu tinggi, diperoleh bahwa SNI 03-2847-2002 masih dapat digunakan di dalam desain penampang beton mutu tinggi.

Kata kunci: beton mutu tinggi

PENDAHULUAN

Beton pertama kali ditemukan pada awal abad Masehi oleh orang di Timur Tengah dan bangsa Romawi yang telah menggunakan material perekat yang diberi nama Bitumen. Kemudian pada abad 19 material beton telah digunakan sebagai material utama dalam suatu struktur, awalnya mutu beton hanya berkisar 25 kg/cm^2 sampai dengan 50 kg/cm^2 . Seiring dengan pesatnya perkembangan ilmu beton bertulang dan beton pratekan yang makin menuntut beton dengan kekuatan yang lebih besar yaitu sampai dengan 100 MPa, bahkan sampai sekuat baja (250 MPa). Aplikasi pertama penggunaan beton mutu tinggi untuk struktur adalah gedung-gedung pencakar langit di Chicago pada tahun 1960, dan anjungan minyak lepas pantai di Scotlandia dan Norwegia tahun 1970.

Di Indonesia, mulai dari peraturan PBI-1955, PBI-1971, SNI 03-2847-1992, dan SNI 03-2847-2002 masih belum mencakup hal-hal yang berkenaan dengan beton mutu tinggi, oleh karena itu tujuan dari kajian pustaka ini adalah ingin mengetahui karakteristik dan konsep desain kapasitas lentur beton mutu tinggi yang meliputi sifat-sifat fisik, dan mekanik.

METODE PENELITIAN

Rancangan penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Kajian mengenai sifat-sifat fisik beton mutu tinggi dan beton mutu normal sebagai pembandingan
- 2) Kajian mengenai sifat-sifat mekanik beton mutu tinggi dan beton mutu normal sebagai pembandingan
- 3) Kajian mengenai aspek desain komponen lentur beton mutu tinggi yang meliputi:
 - a) Diagram blok tegangan-regangan beton mutu normal dan mutu tinggi
 - b) Rasio tulangan minimum komponen lentur
 - c) Rasio tulangan maksimum komponen lentur
 - d) Analisis manual kapasitas lentur balok beton bertulang yang menggunakan peraturan SNI 03-2847-2002 dan beton mutu tinggi

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Klasifikasi dan Peraturan Beton

Klasifikasi mutu beton menurut Prof. Lorrain dapat dibagi dalam beberapa tingkatan (Raka, 1997):

- Beton Mutu Normal (NSC) : $20 < f_c' < 50 \text{ MPa}$

- Beton Mutu Tinggi (HSC) : $50 < f_c' < 80$ MPa
- Beton Mutu Sangat Tinggi (VHSC) : $f_c' > 80$ MPa

Baru-baru ini di *Institute for concrete Technologie*, University of Kassel German, Prof. Schmidt dan Prof. Fehling, selama satu dekade ini telah melakukan penelitian beton yang berbasis teknologi nano, untuk membuat campuran beton dengan kekuatan tekannya mencapai kekuatan baja, yaitu sebesar 2000 kg/cm² (200 MPa) – 2500 kg/cm² (250 MPa). Beton generasi baru ini dikenal dengan nama *Ultra High Performance Concrete* disingkat UHPC, (Harianto, 2009).

Hal yang perlu mendapat perhatian adalah istilah mutu janganlah hanya diartikan kualitas yang berorientasi dengan kekuatan (High Strength Concrete), namun mutu harus diartikan lebih luas, yaitu harus menyangkut aspek kekuatan, keawetan, tingkat pengerjaan dan sebagainya secara menyeluruh. Akhir-akhir ini istilah beton kinerja tinggi (High Performance Concrete) lebih banyak dipakai.

Peraturan di Indonesia tidak secara jelas mengenai batasan beton mutu tinggi, misalnya pada SNI 03-2847-1992 hanya mengklafikasikan beton mutu tinggi apabila $f_c' \geq 55$ MPa, dan SNI 03-2847-2002 mengalami perubahan menjadi $f_c' \geq 58$ MPa. Penggunaan beton dari beberapa negara dalam bentuk peraturan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Peraturan beberapa negara yang mengatur tentang penggunaan beton (Helland, 1996)

No.	Negara	Code	Tahun Terbit	f_c' maks. (MPa)	Standard Ukuran Benda Uji
1.	Indonesia	PBI-71	1971	Tanpa pembatasan	Kubus 150 mm
		SNI 03-2847-2002	2002	58	Silinder 150/300 mm
2.	Internasio nal	CEB-FIP MC-90	1993	80	Silinder 150/300 mm
		Adendum MC	1993	100	
3.	Norwegia	NS 3473	1992	105 94	Kubus 100 mm Silinder 150/300 mm
4.	Finlandia	Rak. MK B4	1983/ 1984	100	Kubus 150 mm
5.	A.S.	ACI 318	1992	Tanpa pembatasan	Silinder 6/12"
6.	Kanada	CSA A23.1-3	1994	Tanpa pembatasan	Silinder 150/300 mm
7.	Jepang	Spesf. for HSC	-	80	Silinder 100/200 mm

No.	Negara	Code	Tahun Terbit	f_c' maks. (MPa)	Standard Ukuran Benda Uji
8.	Jerman	Suppl. to DIN	1994	115	Kubus 200 mm
9.	Swedia	BBK 79	-	80	Kubus 150 mm
10.	Belanda	Suppl. to NEN	1994	105	Kubus 150 mm
11.	Selandia Baru	NZS 3101	1995	100	Silinder 152/304 mm

2. Sifat-Sifat Fisik Beton Mutu Tinggi

Sifat-sifat fisik beton mutu tinggi apabila dibandingkan dengan beton mutu normal dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat Fisik Beton Mutu Tinggi (BMT) dengan Beton Mutu Normal (BMN) (Raka, 1997).

No.	Sifat Fisik yang ditinjau	Beton Mutu Tinggi dengan Beton Mutu Normal	Kesimpulan
1.	Peningkatan kekuatan tekan beton terhadap umur tertentu	Pada awal lebih tinggi selanjutnya hampir sama	Menguntungkan dalam pelaksanaan
2.	Perkembangan panas akibat hidrasi	Lebih besar karena partikel halus lebih banyak	Hati-hati pada susut awal
3.	Sifat termodinamika (kalor spesifik, penyebaran panas (diffusivity), penghantar panas, koefisien muai)	Hampir sama	Sama
4.	Susut	Pada awal lebih tinggi selanjutnya hampir sama Secara umum susut total lebih kecil BMT dibandingkan BMN	Kurang baik Lebih baik
5.	Rangkak	Pada awal lebih tinggi	Pembebanan BMT pada umur muda dihindari Lebih baik
6.	Ketahanan terhadap <i>fatigue</i>	Lebih rendah	Kurang baik
7.	Deformasi akibat beban repetisi	Lebih rendah	Lebih baik

3. Sifat-Sifat Mekanik Beton Mutu Tinggi

Sifat-sifat mekanik beton mutu tinggi apabila dibandingkan dengan beton mutu normal dapat dilihat pada Tabel 3.

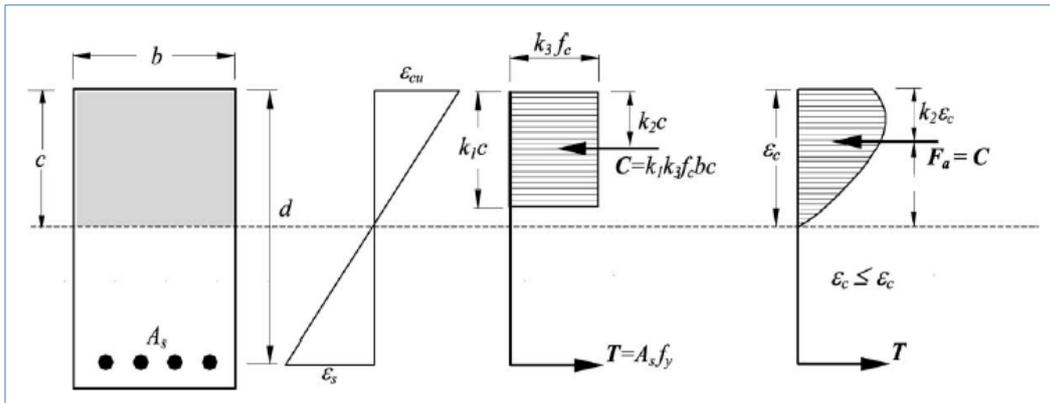
Tabel 3. Sifat-Sifat Mekanik Beton Mutu Tinggi (BMT) dengan Beton Mutu Normal (BMN) (Raka, 1997).

No.	Sifat Mekanik yang ditinjau	Beton Mutu Tinggi dengan Beton Mutu Normal	Kesimpulan
1.	Poisson's Ratio (ν)	0,20 s.d. 0,28 Untuk $55 < f_c' < 80$ MPa	Hampir sama
2.	Regangan Tekan ultimit (ϵ_{cu})	0,003 s.d. 0,004 PBI-1971: $\epsilon_{cu} = 0,0035$ SNI-02: $\epsilon_{cu} = 0,003$ BMN lebih daktail	Lebih rendah
3.	Kuat Tarik membelah (Tensile Splitting Strength)	$f_{sp}' \approx 10\% \cdot f_c' (MPa)$ $0,4 \cdot \sqrt{f_c'} \text{ s.d. } 0,6 \cdot \sqrt{f_c'} (MPa)$	Semakin tinggi
		$f_{sp}' = 0,59 \cdot \sqrt{f_c'} (MPa)$ untuk $21 \text{ MPa} < f_c' < 83 \text{ MPa}$	
4.	Modulus Rupture (Retak) (Flexural tensile strength)	$0,6 \cdot \sqrt{f_c'} \text{ s.d. } 0,96 \cdot \sqrt{f_c'} (MPa)$ SNI-02: $0,7 \cdot \sqrt{f_c'} (MPa)$	Semakin tinggi
		ACI-08: $f_r' = 0,94 \cdot \sqrt{f_c'} (MPa)$ untuk $21 \text{ MPa} < f_c' < 83 \text{ MPa}$	
5.	Kuat Tarik (Direct Tension)	65% s.d. 75% dari f_r' $f_r' = 0,33 \cdot \sqrt{f_c'} (MPa)$	Semakin Tinggi
6.	Modulus Elastisitas (E_c)	SNI-02: $E_c = 0,043 \cdot (w_c^{1,5}) \cdot \sqrt{f_c'} (MPa)$ atau $E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c'} (MPa)$	Bervariasi, Semakin Tinggi
		AS/Kanada/Selandia Baru : $E_c = \left(3320 \sqrt{f_c'} + 6900 \right) \cdot \left(\frac{w_c}{2300} \right)^{1,5} (MPa)$ untuk $21 \text{ MPa} < f_c' < 83 \text{ MPa}$	

4. Aspek Desain Komponen Lentur Beton Mutu Tinggi

- **Diagram Blok Tegangan-Regangan Beton**

Analisis kapasitas lentur suatu penampang beton dilakukan berdasarkan diagram tegangan dan regangan tekan beton seperti pada Gambar 1 (Park R & Paulay T, 1975).



Gambar 1. Diagram tegangan, regangan tekan beton

Kapasitas lentur suatu penampang beton dapat diperoleh dengan persamaan:

$$M_n = k_1 \cdot k_3 \cdot f_c' \cdot b \cdot c \cdot (d - k_2 \cdot c) \text{ atau } M_n = A_s \cdot f_y \cdot d \cdot \left(1 - 0,59 \cdot \rho \cdot \frac{f_y}{f_c'} \right) \dots\dots\dots (1)$$

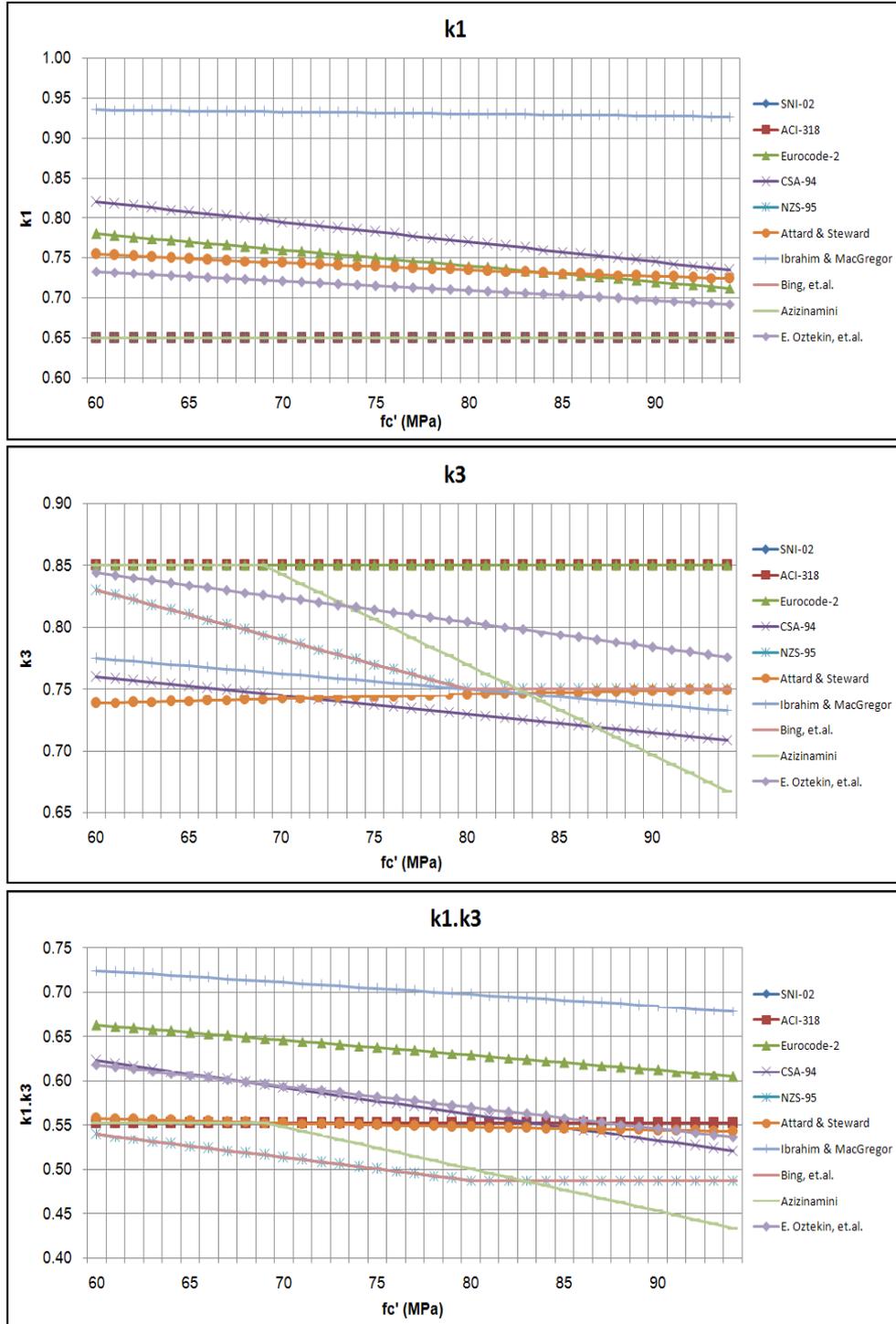
Dimana: $k_1 \cdot k_3 \cdot f_c' \cdot b \cdot c = A_s \cdot f_y$

Nilai faktor blok tegangan beton (k_1, k_2, k_3) dari setiap negara dan beberapa usulan peneliti pada Tabel 4 dan Gambar 2 nampak terlihat berbeda-beda, hal ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai beton mutu tinggi ini masih terus mengalami perkembangan.

Tabel 4. Faktor Blok Tegangan Segiempat Beton (Ertekin, et.al, 2003), (Darmansyah, dkk., 2002), (SNI, 2002) (ACI 318M-08).

Usulan	$k_1 = 2 \cdot k_2$	k_3
SNI 03-2847-2002	$1,0643-0,0071 \cdot f_c'$ ($0,65 \leq k_1 \leq 0,85$)	0,85
ACI-318	$1,09-0,008 \cdot f_c'$ ($0,65 \leq k_1 \leq 0,85$)	0,85
Eurocode-2	$1,09-f_c'/500$	0,85
CSA-94	$0,97-0,0025 \cdot f_c' \geq 0,67$	$0,85-0,0015 \cdot f_c' \geq 0,67$
NZS-95	$1,09-0,008 \cdot f_c'$ ($0,65 \leq k_1 \leq 0,85$)	$1,07-0,004 \cdot f_c'$ ($0,75 \leq k_3 \leq 0,85$)
Attard and Steward	$1,0948 \cdot f_c'^{-0,091} \geq 0,67$	$0,647 \cdot f_c'^{0,0324} \geq 0,58$
Ibrahim and MacGregor	$0,95-f_c'/4000 \geq 0,70$	$0,85-f_c'/800 \geq 0,725$
Bing, et.al	$1,09-0,008 \cdot f_c'$ ($0,65 \leq k_1 \leq 0,85$)	$0,85-0,004 \cdot (f_c'-55) \geq 0,75$
Aziznamini, et.al	$1,09-0,008 \cdot f_c'$ ($0,65 \leq k_1 \leq 0,85$)	$0,85-0,0073 \cdot (f_c'-69) \geq 0,60$ ($0,60 \leq k_3 \leq 0,85$)
Ertekin Oztekin, et.al	$-0,0012 \cdot f_c'+0,805$	$-0,002 \cdot f_c'+0,964$

Secara grafik nilai k_1 , k_3 , dan $k_1.k_3$ dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Faktor blok tegangan k_1 , k_3 , dan $k_1.k_3$

• **Rasio Tulangan Minimum Komponen Lentur**

Tulangan minimum pada sebuah penampang dimaksudkan untuk mencegah terjadinya keruntuhan getas. Perbandingan rasio tulangan minimum dari beberapa peraturan dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan rasio tulangan minimum untuk beton mutu normal dan beton mutu tinggi dari beberapa peraturan SNI-2002, ACI 318M-08, dan Jepang.

Peraturan/Code	Rasio Tulangan Minimum	Syarat
Indonesia SNI-1992	$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y}$	
Indonesia SNI-2002	$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y}$	untuk $f_c' < 30$ MPa
& Amerika ACI 318M-08	$\rho_{min} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 \cdot f_y}$	untuk $f_c' > 30$ MPa
	tapi tidak boleh kurang dari $\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y}$	
Jepang	$\rho_{min} = [(7,5 \cdot 10^{-4} \cdot f_y) + 1,34] \cdot \rho_b$	

• **Rasio Tulangan Maksimum Komponen Lentur**

Secara umum batasan rasio tulangan maksimum juga dimaksudkan untuk mengendalikan perilaku keruntuhan. Untuk mencapai keruntuhan daktail, penampang tidak hanya cukup bertulangan lemah (under reinforced), maka harus ditetapkan batasannya dibawah rasio tulangan seimbang (balanced reinforced).

Nilai rasio tulangan maksimum masih sama antara beton mutu tinggi dan beton mutu normal, yaitu: $0,75 \cdot \rho_b$ untuk beban gravitasi, dan $0,50 \cdot \rho_b$ untuk beban gempa.

$$\rho_{maks} = 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot \left[\frac{0,85 \cdot f_c'}{f_y} \cdot \beta_1 \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \right] \dots\dots\dots (2)$$

• **Daktilitas Kurvatur Penampang**

Analisis daktilitas kurvatur pada suatu penampang struktur beton memegang peranan yang sangat penting, karena apabila sebuah elemen suatu struktur tidak memiliki kemampuan daktail maka keruntuhan getas yang akan terjadi. Elemen struktur yang berperilaku getas tidak memberi cukup waktu kepada pemakai untuk mengamankan diri saat terjadi keruntuhan.

Peninjauan daktilitas kurvatur pada suatu elemen struktur yang menggunakan beton mutu tinggi menjadi suatu keperluan yang sangat mendasar karena secara material beton mutu tinggi mempunyai sifat lebih getas dibandingkan beton biasa.

• Kapasitas Lentur Beton Mutu Tinggi

Kapasitas lentur penampang yang menggunakan beton mutu tinggi dapat ditentukan dengan persamaan (1) dengan nilai (k_1 , k_2 , k_3) berdasarkan usulan dari para peneliti.

Dengan mengambil studi kasus sebuah penampang balok bertulangan tunggal 4D20 ($\rho = 0,00592$) dengan dimensi 400 mm x 600 mm yang menggunakan beton mutu tinggi $f_c' = 70$ MPa, dan mutu baja $f_y = 400$ MPa dengan variabel penampang seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan kapasitas lentur balok beton mutu tinggi bertulangan tunggal berdasarkan SNI-2002, ACI 318M-08 dan beberapa usulan peneliti.

Parameter	BMN					BMT					
	SNI-02	ACI-318	Eurocode-2	CSA-94	NZS-95	Attard & Steward	Ibrahim & MacGregor	Bing, et.al.	Aziznamini	E. Oztekin, et.al.	Halit et.al
b (mm)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
h (mm)	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
ds (mm)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
ϕ_{ut}	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
ϕ_s	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
n (bh)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
fc' (MPa)	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
fy (MPa)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
d (mm)	530	530	530	530	530	530	530	530	530	530	530
As (mm ²)	1256	1256	1256	1256	1256	1256	1256	1256	1256	1256	1256
ρ	0.00592	0.00592	0.00592	0.00592	0.00592	0.00592	0.00592	0.00592	0.00592	0.00592	0.0059245
k1	0.650	0.650	0.760	0.795	0.650	0.744	0.933	0.650	0.650	0.721	0.544
k2	0.325	0.325	0.380	0.398	0.325	0.372	0.466	0.325	0.325	0.361	0.273
k3	0.850	0.850	0.850	0.745	0.790	0.742	0.763	0.790	0.843	0.824	0.850
Mn (kN.m)	266.261995	266.261995	266.261995	266.260585	266.261235	266.260546	266.260847	266.261235	266.261908	266.261679	266.261961

Dari Tabel 6 dapat diketahui bahwa hasil analisis kapasitas lentur yang menggunakan blok tegangan segiempat ekuivalen untuk beton mutu normal menurut peraturan SNI 03-2847-2002 ternyata hasilnya tidak jauh berbeda dengan analisis kapasitas lentur yang menggunakan blok tegangan segiempat untuk beton mutu tinggi, hal ini berarti peraturan SNI 03-2847-2002 masih dapat digunakan untuk mendesain penampang lentur yang menggunakan beton mutu tinggi.

KESIMPULAN

Dari uraian mengenai karakteristik dan desain beton mutu tinggi dapat disimpulkan, sebagai berikut:

1. Peraturan di Indonesia masih belum sepenuhnya mengatur tentang desain beton mutu tinggi, sedangkan peraturan Indonesia SNI 03-2847-2002 hanya mengatur untuk mutu dan desain beton mutu normal.
2. Analisis kapasitas lentur yang menggunakan blok tegangan segiempat ekuivalen untuk beton mutu normal menurut peraturan SNI 03-2847-2002 ternyata

hasilnya tidak jauh berbeda dengan analisis kapasitas lentur yang menggunakan blok tegangan segiempat untuk beton mutu tinggi.

3. Peraturan SNI 03-2847-2002 masih dapat digunakan untuk mendesain penampang lentur yang menggunakan beton mutu tinggi.
4. Kesepakatan sifat-sifat beton dan desain antara beberapa negara maju masih belum kompak, itu menandakan masih perlunya penelitian lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318, 2008, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318 M-08)*, American Concrete Institute.
- Badan Standardisasi Indonesia, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002)*.
- Darmansyah Tjitradi (UNLAM), Rachmat Purwono (ITS), Priyosulistyo (UGM), 2002, *Daktilitas Kolom Segiempat Berlubang yang Terkekang pada Beton Mutu Tinggi*, Majalah Ipteks, ITS Surabaya, Vol 13 No. 2, Edisi Mei.
- Ertekin Oztekin, Selim Pul, Metin Husem, 2003, *Determination of rectangular stress block parameters for high performance concrete*, Engineering Structures Vol. 25, pp. 371–376.
- Hariato Hardjasaputra, 2009, *Mungkinkah beton sekuat baja?*, Majalah KONSTRUKSI, Februari.
- Helland, 1996, *Utilization of High Strength Concrete*, Fourth International Symposium on the utilization of HS/HPC, Paris, 29-31 May.
- Park R & Paulay T, 1975, *Reinforced Concrete Structures*, John Willey & Sun.
- Raka IGP., 1997, *Mengenal Beton Mutu Tinggi*, Seminar Sehari Profesionalisme Sarjana Teknik Dalam Memenuhi Tuntutan Lapangan Kerja Menjelang Persaingan Global Tahun 2003, Himpunan Mahasiswa Sipil Fakultas Teknik Udayana Denpasar, 12 September 1997.