

PENGARUH KAPASITAS PENAMPANG BALOK BETON BERTULANG MUTU TINGGI TERHADAP DEFLEKSI MAKSIMUM

Leonardus Setia Budi Wibowo^{1*}, Agustinus Angkoso¹

¹ Teknik Sipil, Universitas Widya Kartika

Abstrak

Beton bertulang merupakan salah satu material yang paling populer digunakan didalam dunia konstruksi, terutama pada gedung bertingkat rendah, bertingkat sedang maupun bertingkat tinggi. Salah satu keuntungan menggunakan beton mutu tinggi adalah dimensi penampang yang lebih kecil daripada beton mutu normal, namun kerugiannya adalah sifatnya getas sehingga memiliki daktilitas yang rendah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh kapasitas lentur maupun kapasitas geser penampang menggunakan ACI318-14 terhadap drift maksimum yang terjadi. Berdasarkan hasil analisis pada 21 balok beton bertulang yang menggunakan beton mutu tinggi dapat disimpulkan bahwa nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ berbanding lurus dengan drift pada saat beban maksimum. Disisi lain, terdapat dua benda uji balok beton bertulang yang memiliki nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ kurang dari 1,0 tetapi mampu mencapai nilai drift maksimum sebesar 2,0%.

Kata kunci: beton; mutu tinggi; lentur; geser; drift

Abstract

[The Effect of Flexural Cross Section of High-Strength Reinforced Concrete into Maximum Deflection] Reinforced concrete is one of the most popular materials used in the construction, especially for low-rise, medium-rise and high-rise buildings. The advantages of using high-strength concrete include smaller member size but the disadvantage is brittle therefore has low ductility. The aim of this study is to evaluate flexural strength and shear strength of the beam member using ACI318-14 code. Based on the analysis on 21 reinforced concrete beams using high-strength concrete material, it can be concluded that the ratio of $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ has linear correlation to the drift at maximum load. In the other hand, there are two specimens which have a ratio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ lower than 1,0 is capable to reach 2,0% drift value.

Keywords: concrete; high-strength; flexural; shear; drift

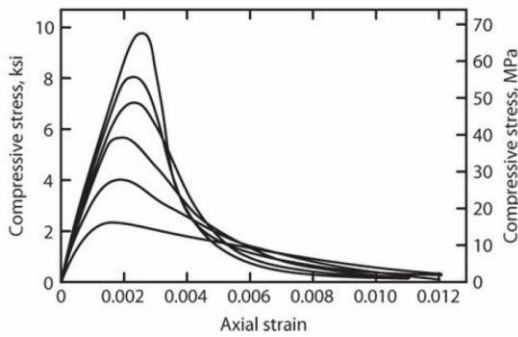
1. Pendahuluan

Beton bertulang dengan kekuatan tekan beton mutu tinggi semakin populer dalam beberapa tahun terakhir ini karena meningkatnya permintaan bangunan bertingkat tinggi di daerah perkotaan. Menurut Mendis dan Panagopoulos (2000), keuntungan utama menggunakan material beton mutu tinggi adalah memiliki kekuatan serta kekakuan yang tinggi, meningkatkan durabilitas serta efisiensi biaya. Selain itu, menggunakan material mutu tinggi dapat mengurangi dimensi penampang suatu struktur.

Berbagai macam laporan memberikan pengertian beton mutu tinggi yang berbeda. Berdasarkan ER-5536 (ICBO, 2001), beton mutu tinggi diartikan sebagai beton berat normal dengan desain mutu lebih dari 41 MPa

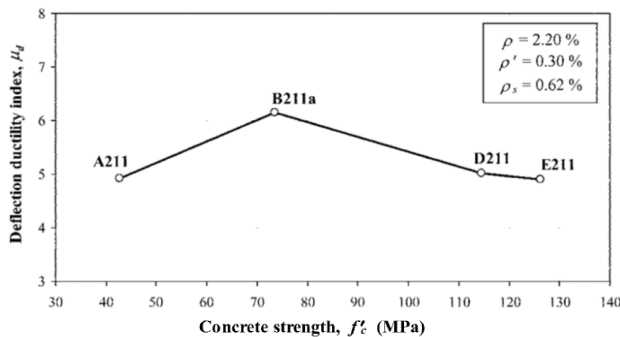
sampai dengan maksimum 83 MPa. Pada publikasi ACI ITG-4.3R0.7 (2008), beton dikatakan memiliki mutu tinggi apabila mutunya lebih dari 55 MPa, sedangkan menurut ACI318 (2014), mutu beton dikatakan memiliki mutu tinggi apabila mutunya lebih dari 69 MPa. Dapat dilihat pada Gambar 1, bahwa semakin tinggi mutu silinder beton, maka sifat getas dari beton tersebut juga semakin tinggi.

Rashid dan Mansur (2009) mengumpulkan data beberapa gedung bertingkat tinggi yang menggunakan beton mutu tinggi antara lain *Water Tower Place* di Chicago dan *Commerce Tower* di Houston yang menggunakan mutu beton 65 MPa, *International First Plaza* di Dallas dan *Nova Scotia Plaza* di Toronto masing-masing menggunakan mutu beton 80 MPa dan 82 MPa.



Gambar 1. Hubungan diagram tegangan-regangan dari beton normal akibat beban uni-aksial (Wischers, 1979)

Rashid dan Mansur (2005) melaporkan hasil penelitian tentang balok beton bertulang yang menggunakan mutu beton antara 42 hingga 126 MPa. Dapat dilihat pada gambar 2, berdasarkan hasil pengujian empat balok beton bertulang yang menggunakan kondisi penulangan yang sama tetapi mutu beton yang berbeda, daktilitas defleksi meningkat ketika mutu beton meningkat juga tetapi hanya sampai pada mutu 70 MPa.



Gambar 2. Daktilitas Balok akibat pengaruh dari Mutu Beton (Rashid and Mansur, 2005)

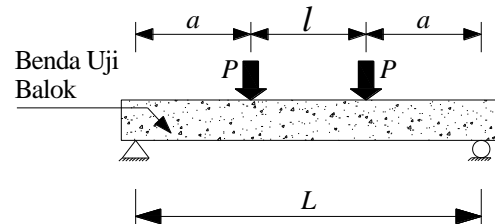
Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh kapasitas lentur (M_n) dan kapasitas geser (V_n) balok beton bertulang yang menggunakan beton mutu tinggi terhadap defleksi maksimum pada tengah bentang, dimana persamaan yang digunakan berdasarkan ACI318 (2014).

Selain itu dilakukan juga analisis nominal kapasitas lentur pada balok beton bertulang terhadap kapasitas lentur saat uji eksperimen. Diharapkan hasil dari penelitian ini menjadi acuan untuk para praktisi maupun akademisi dalam melakukan desain balok beton bertulang terutama yang menggunakan beton mutu tinggi.

2. Bahan dan Metode

Dalam penelitian ini terdapat 21 benda uji balok beton bertulang yang menggunakan beton mutu tinggi.

Seluruh benda uji tersebut merupakan hasil eksperimental dari penelitian terdahulu, yang diberi beban monotonik empat titik (dua beban dengan dua tumpuan sederhana) seperti pada Gambar 3, dengan P adalah beban monotonik, a adalah bentang geser, dan d adalah tinggi efektif balok.



Gambar 3. Tipikal Pembebanan Pada Balok

Data-data balok beton bertulang yang dianalisis pada penelitian ini antara lain, mutu beton tinggi yang digunakan adalah 64,5 – 126,2 MPa. Mutu tulangan utama (f_y) yang digunakan sebesar 377 – 481,5 MPa, sedangkan untuk mutu tulangan sengkang (f_{yt}) sebesar 377 – 541 MPa dengan diameter tulangan minimum D10. Rasio bentang geser dengan tinggi efektif (a/d) yang digunakan dalam penelitian ini adalah 3,2 – 4,0. Data benda uji balok akan ditampilkan pada Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 1. Data mutu beton, lebar dan tinggi efektif

Penulis	Nama Benda Uji	f'_c (MPa)	b (mm)	d (mm)
Kang, T.H.K, <i>et al.</i> (2014)	H0-0,5	64,5	135	230,7
	H0-1,0	64,5	135	229,1
	H0-1,5	64,5	135	227,5
	H0-1,8	64,5	135	225,9
Rashid and Mansur (2005)	B211	74,6	250	357,9
	B211a	73,6	250	357,9
	B312	72,8	250	357,9
	B313	72,8	250	357,9
	D211	114,5	250	357,9
	E211	126,2	250	357,9
Han et al, (2012)	NTB-CON70	70,0	130	140,5
	AN100-0,3	101,7	200	260,0
Kim et al, (2016)	AN100-0,5	101,7	200	260,0
	B311	72,8	250	357,9
Rashid and Mansur (2005)	B321	77,0	250	357,9
	B331	72,8	250	357,9
	C211	85,6	250	357,9
	C311	88,1	250	357,9
	C411	85,6	250	357,9
	B411	77,0	250	357,9
	C511	88,1	250	357,9

Tabel 2. Data mutu, diameter dan jumlah tulangan utama

Penulis	Nama Benda Uji	f_y (tekan) (MPa)	Tul. tekan	f_y (tarik) (MPa)	Tul. tarik
Kang, T.H.K, <i>et al.</i> (2014)	H0-0,5	377	2D10	377	2D10
	H0-1,0	377	2D10	408	2D13
	H0-1,5	377	2D10	389	2D16
	H0-1,8	377	2D10	411	2D19
Rashid and Mansur (2005)	B211	472	2D13	460	4D25
	B211a	472	2D13	460	4D25
	B312	472	2D13	460	3D25
	B313	472	2D13	460	3D25
	D211	472	2D13	460	4D25
E211	472	2D13	460	4D25	
Han <i>et al.</i> , (2012)	NTB-CON70	401	2D22	401	2D22
Kim <i>et al.</i> , (2016)	AN100-0,3	482	2D10	477	3D22
	AN100-0,5	482	2D10	455	3D29
Rashid and Mansur (2005)	B311	472	2D13	460	3D25+3D25
	B321	472	4D13	460	3D25+3D25
	B331	466	4D16	460	3D25+3D25
	C211	472	2D13	466 & 460	2D16+4D25
	C311	472	2D13	466 & 460	4D16+4D25
	C411	472	2D13	460, 537 & 460	2D25+2D20+4D25
	B411	472	2D13	460	4D25
	C511	472	2D13	460	2D16+4D25+4D25

Tabel 2 menunjukkan terdapat 13 benda uji balok beton bertulang yang memiliki satu baris tulangan tekan dan satu baris tulangan tarik. Benda uji B311, B321, B331 C211, C311 dan C411 memiliki komposisi satu baris tulangan tekan dan dua baris tulangan tarik, sedangkan benda uji C511 memiliki komposisi satu baris tulangan tekan dengan tiga baris tulangan tarik.

Jarak sengkang yang digunakan pada balok beton bertulang pada penelitian ini sangat bervariasi, dari 67 mm hingga 200 mm.

Tabel 3. Data mutu, diameter dan spasi tulangan sengkang serta rasio a/d

Penulis	Nama Benda Uji	f_y (MPa)	dia. tul	spasi (mm)	a/d
Kang, T.H.K, <i>et al.</i> (2014)	H0-0,5	377	D10	100	3,90
	H0-1,0	408	D10	100	3,93
	H0-1,5	389	D10	100	3,96
	H0-1,8	411	D10	100	3,98
	B211	460	D10	200	3,35
Rashid and Mansur (2005)	B211a	460	D10	200	3,35
	B312	460	D10	100	3,35
	B313	460	D10	67	3,35
	D211	460	D10	200	3,35
	E211	460	D10	200	3,35
Han <i>et al.</i> , (2012)	NTB-CON70	401	D10	100	3,20
Kim <i>et al.</i> , (2016)	AN100-0,3	477	D10	70	4,00
	AN100-0,5	455	D10	70	4,00
Rashid and Mansur (2005)	B311	460	D10	200	3,35
	B321	460	D10	200	3,35
	B331	460	D10	200	3,35
	C211	466	D10	200	3,35
	C311	466	D10	200	3,35
	C411	460	D10	200	3,35
	B411	460	D10	200	3,35
C511	460	D10	200	3,35	

3. Hasil dan Pembahasan

Kapasitas lentur (M_n) dan kapasitas geser (V_n) balok beton bertulang dihitung berdasarkan persamaan dari ACI 318 (2014) berikut.

$$M_{n,ACI} = C_c \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (1)$$

$$C_c = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b \quad (2)$$

$$C_s = 600 \left(\frac{c - d'}{c} \right) - 0,85 \cdot f'_c \quad (3)$$

$$V_{n,ACI} = V_c + V_s \quad (4)$$

$$V_c = 0,17 \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot a \quad (5)$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot a}{s} \quad (6)$$

dimana:

$$\alpha_1 = 0,85$$

$$\beta_1 = 0,85, f'_c \leq 28 \text{ (MPa)}$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 (f'_c - 28/7) \geq 0,65$$

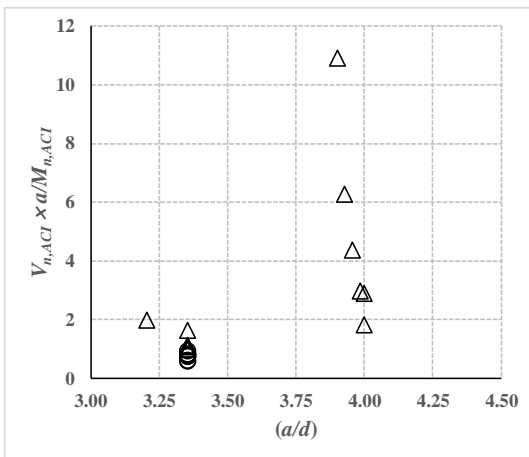
c = tinggi garis netral balok beton bertulang

d = tinggi efektif balok

d' = jarak serat atas terhadap titik berat tulangan tekan

Pada nilai V_n , selain memperhitungkan nilai dari beton (V_c), diperhitungkan pula nilai dari sengkang yang terpasang (V_s). Nilai mutu beton dan mutu baja tulangan yang digunakan dalam perhitungan adalah hasil dari tes material, dengan asumsi nilai tegangan leleh baja

tulangan pada saat kondisi elastik-plastik dan regangan maksimum (ϵ_{cu}) beton sebesar 0,003. Hasil perhitungan perbandingan nilai $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ dapat dilihat pada Gambar 4. Dari 21 benda uji balok bertulang yang menggunakan beton mutu tinggi, terdapat 13 benda uji yang memiliki rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ lebih dari 1,0 dengan asumsi balok beton bertulang mengalami kegagalan lentur terlebih dahulu dan 8 benda uji yang memiliki rasio kurang dari 1,0 yang diasumsikan balok beton bertulang mengalami kegagalan geser terlebih dahulu. Rincian nilai perbandingan $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 4. Distribusi rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ dengan nilai a/d

$V_{mn,ACI}$ adalah kekuatan lentur penampang yang didapatkan nilainya dari perhitungan kapasitas momen dibagi dengan bentang geser balok (a). V_{exp} merupakan beban yang mampu ditahan balok pada saat eksperimen. Perbandingan nilai V_{exp} Dengan $V_{mn,ACI}$ ditampilkan pada Tabel 4. Dari hasil analisis didapatkan nilai rasio terkecil sebesar 0,96 dan rasio terbesar 1,29. Berdasarkan nilai tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa seluruh balok beton bertulang mampu mencapai kapasitas lenturnya.

Tabel 4. Nilai rasio kapasitas geser, kapasitas lentur dan *drift* maksimum

Penulis	Nama Benda Uji	$V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$	$V_{exp} / V_{mn,ACI}$	<i>Drift</i> maks. (%)
Kang, T.H.K, <i>et al.</i> (2014)	H0-0,5	10,91	1,28	5,33
	H0-1,0	6,28	1,25	3,93
	H0-1,5	4,38	1,19	3,11
	H0-1,8	2,98	1,14	2,67
Rashid and Mansur (2005)	B211	1,00	0,98	2,94
	B211a	1,00	0,99	2,47
	B312	1,13	1,10	1,44
	B313	1,63	1,12	1,59
	D211	1,08	1,15	2,24

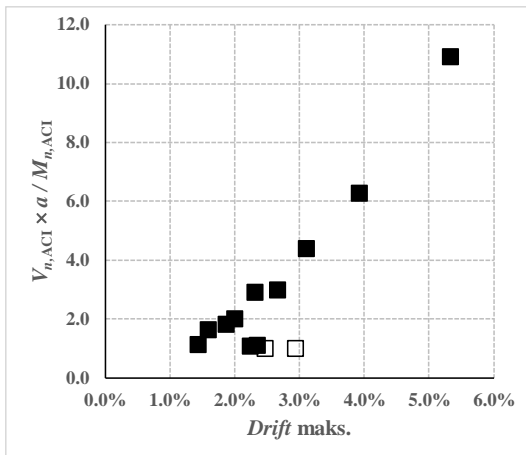
	E211	1,10	1,12	2,35
Han <i>et al.</i> , (2012)	NTB-CON70	1,99	1,28	2,00
Kim <i>et al.</i> , (2016)	AN100-0,3	2,90	1,12	2,31
	AN100-0,5	1,82	1,01	1,87
Rashid and Mansur (2005)	B311	0,76	1,13	1,54
	B321	0,76	1,13	2,02
	B331	0,79	1,14	1,59
	C211	0,93	1,09	2,59
	C311	0,83	1,08	1,66
	C411	0,80	1,29	1,71
	B411	0,60	1,11	1,80
C511	0,61	0,96	1,37	

Drift maksimum diperoleh dari nilai lendutan/defleksi maksimum pada tengah bentang dibagi dengan setengah panjang bentang (L) balok beton bertulang. Besarnya lendutan maksimum berdasarkan beban maksimum (P_{maks}) yang mampu ditahan oleh balok beton bertulang. Berdasarkan Tabel 4, didapatkan empat kondisi yang berbeda pada hasil analisis balok beton bertulang dengan perincian yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Tipe kondisi dari hasil analisis

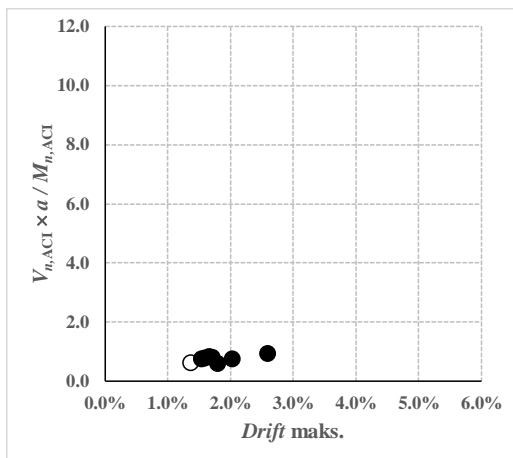
	$V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$	$V_{exp} / V_{mn,ACI}$
Kondisi I	$\geq 1,0$	$\geq 1,0$
Kondisi II	$\geq 1,0$	$< 1,0$
Kondisi III	$< 1,0$	$\geq 1,0$
Kondisi IV	$< 1,0$	$< 1,0$

Pada gambar 5 menampilkan nilai perbandingan pada kondisi I (*solid marker*) dan kondisi II (*hollow marker*), sedangkan Gambar 6 menunjukkan hubungan pada kondisi III (*solid marker*) dan kondisi IV (*hollow marker*). Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ berbanding lurus dengan defleksi maksimum. Semakin tinggi nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ maka semakin tinggi pula nilai *drift* maksimum yang didapatkan.



Gambar 5. Perbandingan rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ dengan *drift* maksimum pada kondisi I dan II

Pada gambar 6, semua nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ adalah kurang dari 1,0, namun dapat dilihat bahwa *drift* maksimum yang dapat dicapai dengan kondisi III tersebut adalah sebesar 2,59% yang terjadi pada benda uji C211, dengan nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ mendekati 1,0.



Gambar 6. Perbandingan rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ dengan *drift* maksimum pada kondisi III dan IV

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis pada 21 balok beton bertulang yang menggunakan beton mutu tinggi, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Semua benda uji mampu mencapai nilai kapasitas lentur ($V_{exp}/V_{mn,ACI}$), termasuk benda uji yang memiliki nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ kurang dari 1,0.
2. Kapasitas penampang pada benda uji yang memiliki nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ lebih dari 1,0 berbanding lurus dengan *drift* pada saat beban maksimum. Semakin tinggi nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ maka *drift* pada saat beban maksimum juga semakin tinggi.

3. Terdapat dua benda uji balok yaitu B321 dan C211 yang mampu mencapai *drift* maksimum 2,0% meskipun memiliki nilai rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ kurang dari 1,0.

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan data balok beton yang lebih bervariasi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penelitian ini, khususnya kepada Universitas Widya Kartika.

Daftar Puskata

ACI Committee 318. (2014). Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI.

ACI Innovation Task Group 4 and Other Contributors. (2008). "Report on Structural Design and Detailing for High-Strength Concrete in Moderate to High Seismic Applications (ACI ITG-4.3 R-07)," *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, 62 pp.

Han, S.- J., Jang, S.- J., Kang, S.- W., and Yun, H.- D. (2012). "Flexural Performance and Cracking Behavior of Expansive SHCC Beam," *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*.

ICBO. (2001). "Seismic Design Utilizing High-Strength Concrete," ICBO ER-5536, *ICBO Evaluation Service Inc.*, Whittier, Calif. http://www.icces.org/reports/pdf_files/UBC/5536.pdf

Kang, T. H.-K., Kim, W. S., Kwak, Y.-K. & Hong, S. G. (2014). Flexural Testing of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates. *ACI Structural Journal*, 111(1), 1-10.

Kim, S.-W., Lee, Y.-J., Lee, Y.-H. & Kim, K.-H. (2016). Flexural Performance of Reinforced High-Strength Concrete Beams with EAF Oxidizing Slag Aggregates. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 15(3), 589-596.

Mendis, P. A. and Panagopoulos, C. (2000). "Applications of High Strength of Concrete in Seismic Region," *12th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1-8) Auckland, New Zealand.

Rashid, M. A., and Mansur, M. A. (2005). "Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure," *ACI Structural Journal*, 102(3), 462-471.

Rashid, M. A., and Mansur, M. A. (2009). "Considerations in Producing High Strength Concrete," *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 37(1), 53-63.

Wischers, G. (1979). "Applications and Effects of Compressive Loads on Concrete," *Betontechnische Berichte 1978*, Betone Verlag GmbH, Dusseldorf, pp. 31-56.