



ANALISIS NILAI KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG BERDASARKAN BEBERAPA PERATURAN DI DUNIA

LEONARDUS SETIA BUDI WIBOWO^{1*}, AGUSTUS ANGKOSO¹

¹*Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Kartika, Surabaya, Jawa Timur*

^{*}*Corresponding Author : ✉ leonarduswibowo@widyakartika.ac.id*

Naskah diterima : 12 Juli 2019. Disetujui: 13 Januari 2021.

ABSTRAK

Pemanfaatan material beton bertulang semakin meningkat, terutama pada struktur bangunan baik bangunan rendah maupun bangunan tinggi. Salah satu kunci dalam suatu struktur adalah perhitungan nilai kapasitas lentur pada elemen balok beton bertulang. Dalam suatu analisis prediksi nilai kapasitas lentur, nilai koefisien pada diagram blok tegangan dan regangan ultimit beton memiliki peranan yang sangat penting. Pada peraturan ACI 318, nilai koefisien tersebut dikembangkan berdasarkan hasil eksperimen pada kolom yang menggunakan beton mutu normal, namun dalam pelaksanaannya hingga saat ini, nilai koefisien tersebut digunakan juga untuk perhitungan pada struktur yang menggunakan beton mutu tinggi. Terdapat beberapa macam peraturan serta laporan ilmiah di dunia dengan nilai koefisien yang berbeda-beda, sehingga mengakibatkan prediksi nilai kapasitas lentur yang berbeda pula. Pada penelitian ini dilakukan analisis prediksi nilai kapasitas lentur balok beton bertulang menggunakan beberapa peraturan yang berlaku di beberapa negara antara lain ACI 318, AS3600, CAN-A23.3, CEB-FIP Model Code, JSCE dan NZS 3101 serta laporan ilmiah ACI ITG-4, dan dari hasil prediksi tersebut dibandingkan dengan nilai kapasitas lentur yang didapatkan dari uji eksperimental. Total terdapat 58 benda uji balok beton bertulang, dengan rincian 35 benda uji yang menggunakan beton mutu normal dibawah 55 MPa dan 23 benda uji yang menggunakan beton mutu tinggi diatas 55 MPa yang diuji dengan beban monotonik. Hasil dari penelitian menunjukkan bahawa peraturan CEB-FIP Model Code memberikan prediksi terbaik untuk beton mutu normal dengan nilai rasio V_{exp}/V_{mn} sebesar 1,085 sedangkan untuk beton mutu tinggi, peraturan ACI 318 memberikan prediksi terbaik dengan nilai rasio V_{exp}/V_{mn} sebesar 1,124.

Kata kunci : balok, beton bertulang, mutu beton, peraturan, lentur

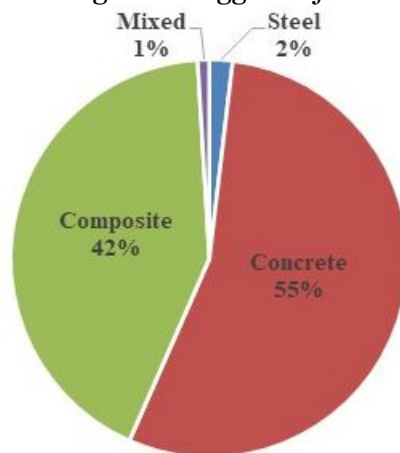
1. PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan salah satu material populer yang sering digunakan dalam dunia konstruksi. Banyak pekerjaan struktur maupun infrastruktur yang menggunakan beton bertulang sebagai material utama, beberapa contohnya antara lain gedung bertingkat

DOI : <https://doi.org/10.25077/jrs.16.3.205-216.2020>

Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

rendah maupun gedung bertingkat tinggi, jembatan, jalan raya dan saluran air. Berdasarkan data studi dari *Council on Tall Buildings and Urban Habit* (CTUBH, 2020), tentang bangunan diatas 200 m yang telah selesai dibangun pada tahun 2020, terdapat 58 bangunan dari 100 bangunan yang menggunakan material beton bertulang. Perbandingan penggunaan material lain untuk bangunan tinggi disajikan dalam diagram pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Perbandingan penggunaan material konstruksi pada konstruksi gedung diatas 200 m pada tahun 2020 (CTUBH, 2020)

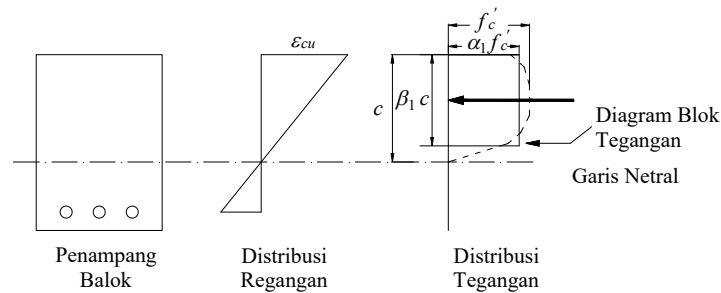
Peraturan/standar adalah pedoman utama bagi para praktisi teknik sipil untuk melakukan suatu perhitungan struktur yang salah satunya adalah perhitungan prediksi nilai kapasitas lentur suatu elemen struktur balok beton bertulang. Pada analisis nilai prediksi kapasitas lentur, beton memiliki peranan penting, dimana pada beton itu sendiri memiliki dua bagian dalam perhitungan yaitu diagram blok tegangan dan regangan ultimit. Peraturan yang berlaku pada setiap negara memiliki perbedaan dalam menentukan nilai koefisien (α_1 , β_1 dan ϵ_{cu}) yang digunakan. Dalam penelitian ini akan dibahas perbandingan prediksi nilai kapasitas lentur balok beton bertulang menggunakan tujuh macam peraturan dari beberapa negara, antara lain peraturan dari negara Amerika Serikat (ACI 318, 2014), Australia (AS3600, 2001), Kanada (CSA-A23.3, 2004), Eropa (CEB-FIP, 2010), Jepang (JSCE, 2010), dan Selandia Baru (NZS3101, 2006). Selain dari beberapa peraturan tersebut, terdapat *Innovation Task Group* (ACI ITG-4.3, 2008) yang membuat laporan ilmiah tentang koefisien diagram blok. Peraturan beton struktural untuk bangunan gedung di Indonesia (SNI 2847, 2013) hingga saat ini masih mengutip dari ACI 318 edisi 2011 (ACI 318, 2011) terutama untuk perhitungan prediksi nilai kapasitas lentur.

Pada tahun 2011, Metwally mempublikasikan penelitian dengan menggunakan 53 benda uji balok beton bertulang yang hanya menggunakan tulangan tarik dan beton mutu tinggi. Dari hasil analisis, didapatkan bahwa peraturan CEB-FIP Model MC90 (CEB-FIP, 1993) memberikan hasil prediksi terbaik dengan nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} sebesar 1,011 dan nilai koefisien variasi (CoV) sebesar 13,53% (Metwally, 2011). Pada tahun 2019, hasil penelitian dari Al-Kamal menunjukkan bahwa peraturan CEB-FIP Model Code (2010) memberikan nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} yang mendekati 1,00 yaitu sebesar 1,01 dengan standar deviasi 0,159 pada 52 benda uji balok beton bertulang yang hanya menggunakan tulangan tarik dan beton mutu tinggi diatas 55 MPa (Al-Kamal, 2019).

Oleh karena itu dalam penelitian ini akan dilakukan analisis nilai kapasitas lentur menggunakan beberapa peraturan yang digunakan pada beberapa negara di dunia dan laporan ilmiah dari ACI ITG serta melakukan evaluasi dengan membandingkan nilai

prediksi kapasitas lentur dengan nilai uji eksperimental pada balok beton bertulang baik untuk beton yang menggunakan mutu normal maupun mutu tinggi.

Diagram blok tegangan pada kuat tekan beton (f'_c) merupakan salah satu komponen penting dalam perhitungan prediksi nilai kapasitas lentur pada balok beton bertulang dan pertama kali diperkenalkan oleh Whitney (Whitney, 1937). Nilai kapasitas lentur diasumsikan terjadi pada suatu nilai tertentu dari nilai regangan beton pada serat terekstrim, yaitu ϵ_{cu} . Diagram blok tegangan seperti yang ditampilkan pada **Gambar 2**, terdiri dari dua parameter, α_1 dan β_1 . α_1 adalah perbandingan antara panjang blok tegangan dengan tegangan maksimum sedangkan β_1 adalah faktor yang menghubungkan tinggi blok tegangan tekan persegi ekuivalen dengan tinggi sumbu netral.



Gambar 2. Diagram Blok Tegangan dan Distribusi Tegangan Regangan

Peraturan ACI 318 memberikan nilai koefisien α_1 secara konstan pada setiap mutu beton yang digunakan pada beton bertulang yaitu sebesar 0,85 sedangkan pada beberapa peraturan beton lainnya memiliki nilai α_1 yang variasi berdasarkan mutu beton yang digunakan. Peraturan AS3600 dan CAN-A23.3 memberikan nilai koefisien α_1 hingga 0,67 untuk mutu beton yang tinggi, sedangkan peraturan *fib* Model Code memberikan nilai koefisien hingga 0,60 pada mutu beton hingga 90 MPa. Untuk nilai koefisien β_1 pada semua peraturan mengalami perubahan, sesuai dengan mutu beton yang digunakan. Semakin tinggi mutu beton, maka semakin kecil nilai koefisien β_1 yang digunakan. ACI318, ACI ITG-4 dan NZS3101 memberikan nilai koefisien hingga 0,65 untuk beton mutu tinggi. Nilai regangan beton (ϵ_{cu}) pada peraturan ACI318, ACI ITG-4, AS3600 dan NZS 3101 bernilai tetap, yaitu sebesar 0,003. Peraturan CAN-A23.3 memberikan nilai konstan untuk regangan beton sebesar 0,0035, sedangkan CEB-FIP Model Code dan JSCE memberikan nilai regangan beton yang bervariasi, tergantung dari mutu beton yang digunakan. Beberapa rekomendasi nilai α_1 , β_1 dan ϵ_{cu} untuk diagram blok tegangan dan regangan dari berbagai macam peraturan/laporan ilmiah dari beberapa negara dirangkum dalam **Tabel 1**, dimana f'_c adalah nilai mutu beton.

Tabel 1. Nilai parameter α_1 , β_1 dan ϵ_{cu} berdasarkan beberapa peraturan di dunia

Peraturan	α_1 (f'_c dalam MPa)	β_1 (f'_c dalam MPa)	ϵ_{cu}
ACI 318	0,85	0,85; $f'_c \leq 28$ $0,85-0,05 (f'_c-28/7) \geq 0,65$	0,0030
ACI ITG-4	0,85; $f'_c \leq 28$ $0,85-0,05 (f'_c-55/7) \geq 0,7$	0,85; $f'_c \leq 28$ $0,85-0,05 (f'_c-28/7) \geq 0,65$	0,0030
AS3600	$1,0-0,003f'_c$ $0,67 \leq \alpha_1 \leq 0,85$	$1,05-0,007f'_c$ $0,67 \leq \beta_1 \leq 0,85$	0,0030

Peraturan	α_1 (f'_c dalam MPa)	β_1 (f'_c dalam MPa)	ϵ_{cu}
CAN-A23.3	$0,85-0,0015f'_c \geq 0,67$	$0,97-0,0025f'_c \geq 0,67$	0,0035
CEB-FIP Model Code	$1,00; f'_c \leq 50$ $1,00-(f'_c-50)/200;$ $50 < f'_c \leq 90$	$0,8; f'_c \leq 50$ $0,8-(f'_c-50)/400;$ $50 < f'_c \leq 90$	$0,0035; f'_c \leq 50$ $0,0026+0,035 \left[\frac{90-f'_c}{100} \right]^4$
JSCE	$1-0,003f'_c \leq 0,85$	$0,52 - 80 \epsilon_{cu}$	$\left[\frac{155-f'_c}{30000} \right]$ $0,0025 \leq \epsilon_{cu} \leq 0,0035$
NZS 3101	$0,85; f'_c \leq 55$ $0,85-0,004(f'_c-55) \geq 0,7$	$0,85; f'_c \leq 30$ $0,85-0,008(f'_c-30) \geq 0,65$	0,0030

Untuk mengetahui suatu balok beton bertulang mengalami kegagalan lentur ataupun kegagalan geser, maka diperlukan suatu perhitungan, dimana nilai kapasitas geser harus lebih besar daripada nilai kapasitas lentur. Berdasarkan ACI 318, kapasitas geser (V_n) terdiri dari beton (V_c) dan tulangan geser (V_s), yang ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$V_n = V_c + V_s \tag{1}$$

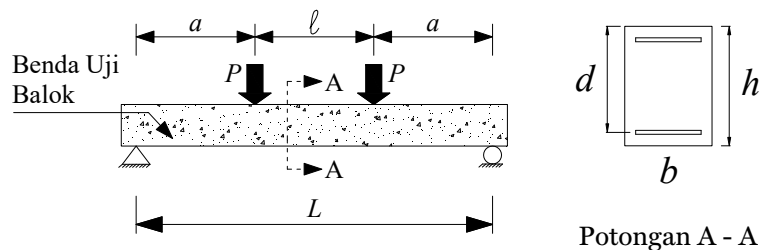
$$V_c = 0,17 \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \tag{2}$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d}{s} \tag{3}$$

Dimana b adalah lebar balok, d adalah tinggi efektif balok, A_v adalah luas tulangan geser, f_{yt} adalah mutu tulangan geser, dan s adalah jarak antar tulangan geser.

2. METODOLOGI PENELITIAN

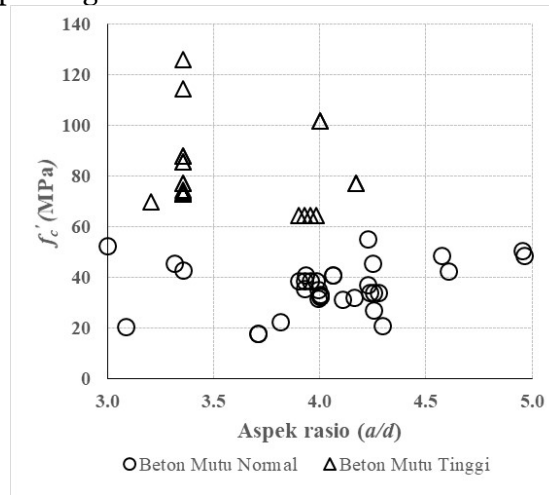
Total terdapat 58 benda uji balok beton bertulang yang digunakan dalam penelitian ini dengan rincian 35 benda uji balok beton bertulang dengan beton mutu normal dan 23 benda uji balok beton bertulang dengan beton mutu tinggi. Pembebanan monotonik pada benda uji balok dilakukan dengan menggunakan dua titik beban simetris seperti pada Gambar 3.



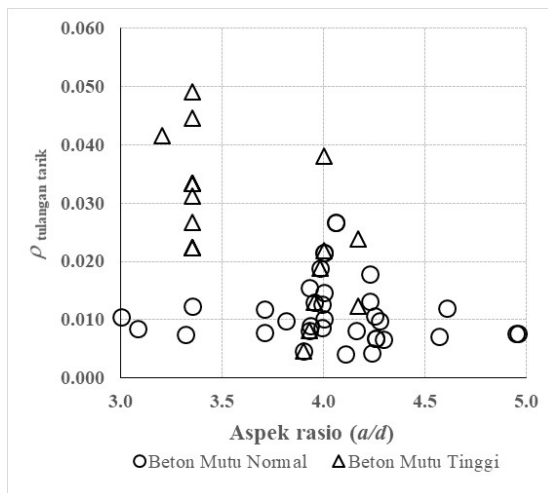
Gambar 3. Tipikal Pembebanan Pada Balok

Rasio bentang geser dengan tinggi efektif (a/d) yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 3,00 – 4,96. Mutu beton normal yang digunakan berada direntang 18 – 55 MPa, sedangkan untuk beton mutu tinggi berada direntang 64 – 126 MPa, untuk distribusi mutu beton yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Gambar 4. Mutu tulangan utama (f_y) yang digunakan sebesar 377 – 533 MPa, sedangkan untuk mutu tulangan sengkang (f_{yt}) sebesar 250 – 541 MPa. Semua benda uji balok beton bertulang menggunakan tulangan D10 sebagai diameter minimum untuk tulangan geser. Mutu material, dimensi balok, rasio tulangan

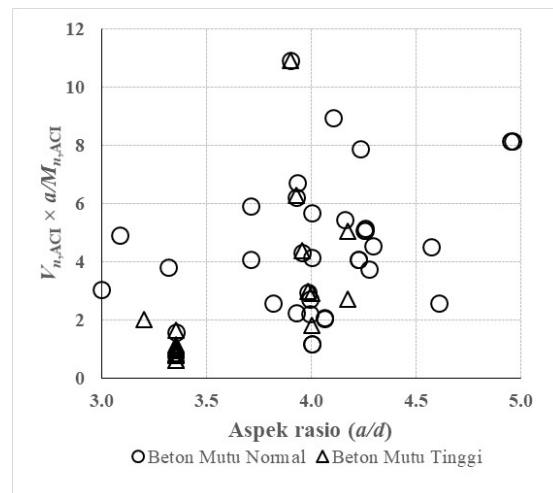
tarik serta aspek rasio (a/d) yang digunakan pada benda uji balok ditampilkan pada **Tabel 2** untuk beton mutu normal dan **Tabel 3** untuk beton mutu tinggi, sedangkan untuk distribusi rasio tulangan tarik serta perbandingan nilai $V_{n,ACI} \times a/M_{n,ACI}$ ditampilkan masing-masing pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**. Simbol yang digunakan pada gambar adalah lingkaran untuk beton mutu normal dan segitiga untuk beton mutu tinggi. Benda uji balok dikumpulkan dari beberapa penelitian yang telah dipublikasikan, baik dari pada jurnal, prosiding seminar maupun tugas akhir.



Gambar 4. Mutu beton dengan aspek rasio (a/d)



Gambar 5. Rasio tulangan tarik dengan aspek rasio (a/d)



Gambar 6. Perbandingan rasio $V_{n,ACI} \times a / M_{n,ACI}$ dengan aspek rasio (a/d)

Tabel 2. Detail benda uji balok beton bertulang menggunakan beton mutu normal

Nama benda uji	Penulis	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_{yt} (MPa)	b (mm)	d (mm)	$\rho_{tul, tarik}$ (%)	a/d
B1	(Bonacci & Maalej, 2000)	22,6	484	507	270	340,7	0,97	3,82
Control	(Grace et al., 2002)	55,2	419	419	152	198,5	1,32	4,23
5 F-C	(Greene & Myers, 2013)	45,4	489	469	203	252,7	0,74	3,32
Monotonic 3 m	(Heffernan & Erki, 2004)	37,0	511	411	150	260,3	1,79	4,23
B-U	(Hong, Lee, et al., 2011)	21,0	506	518	300	395,7	0,67	4,30
ALII	(Hong, Han, et al., 2011)	27,0	528	533	250	352,5	0,68	4,26
AMI		34,0	525	533	250	354,1	0,43	4,24

Nama benda uji	Penulis	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_{yt} (MPa)	b (mm)	d (mm)	$\rho_{ul,tarik}$ (%)	a/d
AMII		34,0	528	533	250	352,5	0,68	4,26
AMIII		34,0	512	533	250	350,9	0,98	4,27
Control	(Jung et al., 2005)	31,3	426	426	200	255,7	0,42	4,11
ST-4	(Kassem et al., 2011)	40,8	460	460	200	222,4	0,90	3,93
N0-0,5		38,6	377	377	135	230,7	0,46	3,90
N0-1,0		38,6	408	377	135	229,1	0,82	3,93
N0-1,5	(Kang et al., 2014)	38,6	389	377	135	227,5	1,29	3,96
N0-1,8		38,6	411	377	135	225,9	1,88	3,98
CB1	(Khan & Naseem, 2008)	20,7	415	415	150	178,3	0,85	3,08
CONTR	(H. S. Kim & Shin, 2011)	31,9	531	443	150	209,1	0,81	4,16
A111	(Rashid & Mansur, 2005)	42,8	460	541	250	357,9	1,23	3,35
R2C		18,0	435	435	150	215,7	0,78	3,71
R3C	(Shin & Lee, 2003)	18,0	435	435	150	215,7	1,17	3,71
ST	(Svecova & Razaqpur, 2000)	45,5	430	430	165	200,0	1,07	4,25
RB	(Täljsten, 2001)	48,6	490	490	200	262,0	0,76	4,96
B1	(Yotakhong, 2003)	48,6	438	432	304,8	400,1	0,70	4,57
AN24-0,3		32,4	483	482	200	260,0	1,02	4,00
AN24-0,5	(Kim et al., 2016)	32,4	477	482	200	260,0	1,46	4,00
F-AN	(Kim et al., 2012)	31,7	430	453	200	300,5	1,27	3,99
C1		32,9	484	414	300	400,0	2,16	4,00
C2	(Giduquio et al., 2015)	33,2	484	414	300	400,0	2,16	4,00
4B4-0,7(C0,2)		41,0	450	395	140	206,9	2,67	4,06
4B4-0,7(C0,3)	(Jang et al., 2008)	41,0	450	395	140	206,9	2,67	4,06
Reference	(Hadi et al., 2018)	42,3	540	250	200	260,5	1,21	4,61
CTRL	(Li, Liu, et al., 2019)	35,4	390	295	200	305,5	1,54	3,93
CTRL	(Li, Jiang, et al., 2019)	52,5	477	452	200	300,0	1,05	3,00
A	(Wight et al., 2001)	35,0	500	450	300	501,1	0,87	3,99
Ref	(Nordin & Täljsten, 2006)	50,6	496	496	200	262,5	0,76	4,95

Tabel 3. Detail benda uji balok beton bertulang menggunakan beton mutu tinggi

Nama benda uji	Penulis	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_{yt} (MPa)	b (mm)	d (mm)	$\rho_{ul,tarik}$ (%)	a/d
H0-0,5		64,5	377	377	135	230,7	0,46%	3,90
H0-1,0		64,5	408	377	135	229,1	0,82%	3,93
H0-1,5	(Kang et al., 2014)	64,5	389	377	135	227,5	1,29%	3,96
H0-1,8		64,5	411	377	135	225,9	1,88%	3,98
B211		74,6	460	479	250	357,9	2,23%	3,35
B211a		73,6	460	479	250	357,9	2,23%	3,35
B312		72,8	460	479	250	357,9	3,34%	3,35
B313	(Rashid & Mansur, 2005)	72,8	460	541	250	357,9	3,34%	3,35
D211		114,5	460	479	250	357,9	2,23%	3,35
E211		126,2	460	479	250	357,9	2,23%	3,35
AH0	(Hashemi et al., 2009)	77,0	413	421	150	215,7	1,23%	4,17
BH0		77,0	413	421	150	215,7	2,39%	4,17
NTB-CON70	(Han et al., 2012)	70,0	401	401	130	140,5	4,16%	3,20
AN100-0,3		101,7	477	482	200	260,0	2,19%	4,00
AN100-0,5	(Kim et al., 2016)	101,7	455	482	200	260,0	3,81%	4,00
B311		72,8	460	479	250	357,9	3,34%	3,35
B321		77,0	460	479	250	357,9	3,34%	3,35
B331		72,8	460	541	250	357,9	3,34%	3,35
C211		85,6	466	541	250	357,9	2,67%	3,35
C311	(Rashid & Mansur, 2005)	88,1	466	541	250	357,9	3,12%	3,35
C411		85,6	460	541	250	357,9	3,34%	3,35
B411		77,0	460	479	250	357,9	4,46%	3,35
C511		88,1	460	541	250	357,9	4,90%	3,35

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rasio perbandingan antara hasil eksperimen balok beton bertulang dengan nilai prediksi kapasitas lentur dapat dilihat pada **Tabel 4** untuk beton mutu normal dan pada **Tabel 5** untuk beton mutu tinggi. Hasil rekapitulasi nilai rata-rata dan nilai koefisien variasi dari hasil perhitungan prediksi menggunakan beberapa peraturan ditampilkan pada **Tabel 6** dan **Tabel 7**, masing-masing untuk beton mutu normal dan beton mutu tinggi. Nilai V_{exp} didapatkan dari hasil eksperimental balok beton bertulang pada saat kondisi maksimal, sedangkan nilai V_{mn} didapatkan dari prediksi nilai kapasitas lentur (M_n) dibagi dengan panjang bentang geser (a).

Berdasarkan pada Tabel 4, terdapat dua benda uji yang memiliki nilai V_{exp}/V_{mn} lebih kecil daripada 1,00 pada semua peraturan yang dianalisis, yaitu masing-masing pada benda uji A (Wight et al., 2001) dan benda uji Ref (Nordin & Täljsten, 2006). Peraturan CEB-FIP Model Code (2010) memberikan nilai prediksi V_{exp}/V_{mn} lebih kecil daripada 1,00 dimana saat peraturan lainnya memberikan nilai V_{exp}/V_{mn} sama atau lebih besar dari 1,00 yaitu pada benda uji 5-FC (Greene & Myers, 2013), CONTR (Kim & Shin, 2011) dan Reference (Hadi et al., 2018).

Pada balok beton bertulang yang menggunakan beton mutu tinggi (**Tabel 5**), terdapat dua benda uji yang memiliki nilai V_{exp}/V_{mn} lebih kecil daripada 1,00 dari semua peraturan, yaitu benda uji B211 (Rashid & Mansur, 2005) serta benda uji BHO (Hashemi et al., 2009). Benda uji B211a (Rashid & Mansur, 2005) memiliki nilai V_{exp}/V_{mn} lebih kecil daripada 1,00 pada perhitungan peraturan ACI318, ACI ITG-4 dan CEB-FIP Model Code, sedangkan pada benda uji C511 (Rashid & Mansur, 2005) memiliki nilai V_{exp}/V_{mn} sama dengan 1,00 hanya pada peraturan AS3600 dan NZS3100.

Tabel 4. Perbandingan nilai V_{exp}/V_{mn} pada benda uji balok yang menggunakan beton mutu normal

Nama Benda Uji	Penulis	V_{exp}/V_{mn}						
		ACI 318	ACI ITG-4	AS3600	CAN-A23.3	CEB-FIP Model Code	JSCE	NZS 3101
B1	(Bonacci & Maalej, 2000)	1,09	1,09	1,09	1,10	1,07	1,09	1,09
Control	(Grace et al., 2002)	1,26	1,26	1,27	1,26	1,22	1,25	1,26
5 F-C	(Greene & Myers, 2013)	1,02	1,02	1,02	1,02	0,99	1,01	1,02
Monotonic m	(Heffernan & Erki, 2004)	1,06	1,06	1,06	1,07	1,05	1,06	1,06
B-U	(Hong, Lee, et al., 2011)	1,01	1,01	1,02	1,02	1,00	1,01	1,01
ALII	(Hong, Han, et al., 2011)	1,10	1,10	1,10	1,10	1,09	1,10	1,10
AMI		1,13	1,13	1,13	1,14	1,12	1,13	1,13
AMII		1,12	1,12	1,12	1,12	1,11	1,12	1,12
AMIII		1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,04	1,04
Control	(Jung et al., 2005)	1,23	1,23	1,23	1,23	1,19	1,23	1,23
ST-4	(Kassem et al., 2011)	1,07	1,07	1,07	1,08	1,04	1,07	1,07
NO-0,5	(Kang et al., 2014)	1,23	1,23	1,22	1,22	1,19	1,22	1,22
NO-1,0		1,25	1,25	1,25	1,25	1,22	1,24	1,25
NO-1,5		1,14	1,14	1,14	1,14	1,12	1,14	1,14
NO-1,8		1,12	1,12	1,12	1,13	1,10	1,12	1,12
CB1	(Khan & Naseem, 2008)	1,22	1,22	1,23	1,22	1,21	1,22	1,22
CONTR	(Kim & Shin, 2011)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00
A111	(Rashid & Mansur, 2005)	1,13	1,13	1,13	1,13	1,11	1,12	1,13
R2C	(Shin & Lee, 2003)	1,08	1,08	1,08	1,09	1,07	1,08	1,08
R3C		1,13	1,13	1,13	1,13	1,11	1,12	1,13

Nama Benda Uji	Penulis	V_{exp}/V_{mn}						
		ACI 318	ACI ITG-4	AS3600	CAN-A23.3	CEB-FIP Model Code	JSCE	NZS 3101
ST	(Svecova & Razaqpur, 2000)	1,22	1,22	1,22	1,22	1,18	1,21	1,22
RB	(Täljsten, 2001)	1,05	1,05	1,05	1,05	1,03	1,05	1,05
B1	(Yotakhong, 2003)	1,13	1,13	1,13	1,14	1,12	1,13	1,13
AN24-0,3	(Kim et al., 2016)	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,03	1,03
AN24-0,5		1,09	1,09	1,09	1,09	1,07	1,09	1,09
F-AN	(Kim et al., 2012)	1,01	1,01	1,01	1,02	1,00	1,02	1,01
C1	(Giduquio et al., 2015)	1,04	1,04	1,04	1,04	1,01	1,03	1,04
C2		1,08	1,08	1,08	1,09	1,05	1,08	1,08
4B4-0,7(C0,2)	(Jang et al., 2008)	1,09	1,09	1,09	1,10	1,06	1,09	1,09
4B4-0,7(C0,3)		1,11	1,11	1,11	1,12	1,09	1,11	1,11
Reference	(Hadi et al., 2018)	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00
CTRL	(Li, Liu, et al., 2019)	1,18	1,18	1,18	1,19	1,17	1,18	1,18
CTRL	(Li, Jiang, et al., 2019)	1,25	1,25	1,25	1,26	1,24	1,25	1,25
A	(Wight et al., 2001)	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98
Ref	(Nordin & Täljsten, 2006)	0,98	0,98	0,98	0,98	0,96	0,98	0,98

Tabel 5. Perbandingan nilai V_{exp}/V_{mn} pada benda uji balok yang menggunakan beton mutu tinggi

Nama Benda Uji	Penulis	V_{exp}/V_{mn}							
		ACI 318	ACI ITG-4	AS3600	CAN-A23.3	CEB-FIP Model Code	JSCE	NZS 3101	
H0-0,5	(Kang et al., 2014)	1,28	1,28	1,28	1,29	1,27	1,28	1,28	
H0-1,0		1,25	1,25	1,25	1,25	1,23	1,25	1,26	
H0-1,5		1,19	1,19	1,20	1,20	1,18	1,19	1,20	
H0-1,8		1,14	1,14	1,14	1,15	1,13	1,14	1,14	
B211	(Rashid & Mansur, 2005)	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	
B211a		0,99	0,99	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	
B312		1,10	1,11	1,11	1,12	1,10	1,11	1,11	
B313		1,12	1,12	1,13	1,14	1,11	1,13	1,13	
D211		1,15	1,16	1,16	1,16	1,17	1,15	1,15	
E211		1,12	1,13	1,14	1,13	1,14	1,13	1,13	
AH0		(Hashemi et al., 2009)	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,07	1,08
BH0			0,95	0,95	0,96	0,96	0,95	0,96	0,96
NTB-CON70		(Han et al., 2012)	1,28	1,29	1,29	1,30	1,26	1,29	1,30
AN100-0,3		(Kim et al., 2016)	1,12	1,13	1,13	1,13	1,15	1,13	1,13
AN100-0,5	1,01		1,02	1,03	1,03	1,06	1,02	1,02	
B311	(Rashid & Mansur, 2005)	1,13	1,14	1,14	1,15	1,13	1,15	1,14	
B321		1,13	1,14	1,14	1,15	1,13	1,15	1,14	
B331		1,14	1,15	1,15	1,15	1,14	1,15	1,15	
C211		1,09	1,10	1,10	1,10	1,09	1,10	1,10	
C311		1,08	1,09	1,09	1,10	1,09	1,09	1,09	
C411		1,29	1,30	1,31	1,31	1,30	1,31	1,31	
B411		1,11	1,13	1,14	1,15	1,11	1,14	1,16	
C511		0,96	0,99	1,00	0,99	0,98	0,99	1,00	

Berdasarkan perhitungan rata-rata V_{exp}/V_{mn} dari **Tabel 4** dan **Tabel 5**, maka didapatkan nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} pada tiap peraturan lebih besar dari 1,00, untuk beton mutu normal

ditampilkan pada **Tabel 6** dan untuk beton mutu tinggi pada **Tabel 7**. Pada balok beton bertulang yang menggunakan beton normal, dapat dilihat bahwa peraturan CEB-FIP Model Code memberikan nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} paling mendekati nilai rata-rata sama dengan 1,00 yaitu sebesar 1,085 dengan nilai koefisien variasi sebesar 0,073. Peraturan CAN-A23.3 memberikan nilai yang lebih konservatif, yaitu nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} sebesar 1,109 dengan nilai koefisien variasi sebesar 0,074. Terdapat 33 benda uji atau sekitar 94,3% benda uji dari 35 benda uji menggunakan beton normal memiliki prediksi nilai kapasitas lentur lebih rendah dari nilai uji coba berdasarkan peraturan CAN-A23.3.

Beberapa peraturan memberikan variasi pada nilai α_1 dan nilai ε_{cu} untuk perhitungan kapasitas betonnya (Tabel 1), kecuali pada ACI 318 memiliki nilai α_1 dan nilai ε_{cu} yang tetap. Pada Tabel 7 dapat dilihat bahwa peraturan ACI 318 memiliki nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} paling mendekati 1,00 daripada peraturan lainnya, yaitu memiliki nilai rata-rata sebesar 1,124 dengan nilai koefisien variasi sebesar 0,082. Seperti halnya pada beton mutu normal, pada beton mutu tinggi, peraturan CAN-A23.3 juga memberikan nilai yang paling konservatif, yaitu nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} sebesar 1,137 dengan nilai koefisien variasi sebesar 0,080. Untuk mutu beton (f'_c) diatas 90 MPa, nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} pada peraturan ACI 318 menunjukkan nilai rata-rata mendekati 1,00 daripada menggunakan peraturan CEB-FIP Model Code. Hal ini dikarenakan CEB-FIP Model Code hanya membatasi nilai koefisien α_1 untuk mutu beton dengan mutu maksimal sebesar 90 MPa.

Berdasarkan penelitian sebelumnya (Al-Kamal, 2019; Metwally, 2011) yang menunjukkan hasil bahwa peraturan CEB-FIP Model Code memberikan nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} paling mendekati 1,00, maka hasil dari penelitian ini juga menunjukkan bahwa peraturan CEB-FIP Model Code terutama untuk balok beton bertulang yang menggunakan beton mutu normal memiliki nilai rata-rata V_{exp}/V_{mn} paling mendekati 1,00.

Tabel 6. Hasil Rekapitulasi pada beton mutu normal

	$V_{exp}/V_{mn,ACI318}$	$V_{exp}/V_{mn,ACI}$ ITG- 4	$V_{exp}/V_{mn,AS3600}$	$V_{exp}/V_{mn,CAN}$	$V_{exp}/V_{mn,CEB-FIP}$	$V_{exp}/V_{mn,JSCE}$	$V_{exp}/V_{mn,NZS}$
Rata-rata	1,105	1,105	1,105	1,109	1,085	1,102	1,105
CoV	0,075	0,075	0,075	0,074	0,073	0,074	0,075
$V_{exp}/V_{mn} > 1$	31	31	31	33	30	31	31
Prosentase	88,6%	88,6%	88,6%	94,3%	85,7%	88,6%	88,6%

Tabel 7. Hasil Rekapitulasi pada beton mutu tinggi

	$V_{exp}/V_{mn,ACI318}$	$V_{exp}/V_{mn,ACI}$ ITG- 4	$V_{exp}/V_{mn,AS3600}$	$V_{exp}/V_{mn,CAN}$	$V_{exp}/V_{mn,CEB-FIP}$	$V_{exp}/V_{mn,JSCE}$	$V_{exp}/V_{mn,NZS}$
Rata-rata	1,121	1,129	1,134	1,137	1,124	1,132	1,134
CoV	0,082	0,081	0,080	0,080	0,077	0,079	0,080
$V_{exp}/V_{mn} > 1$	20	20	20	21	20	20	20
Prosentase	87,0%	87,0%	87,0%	91,3%	87,0%	87,0%	87,0%

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dengan menggunakan 53 benda uji balok beton bertulang, yang terdiri dari 35 benda uji menggunakan balok beton mutu normal dan 23 benda uji dengan menggunakan balok beton mutu tinggi, maka dapat diambil beberapa kesimpulan:

1. Peraturan CEB-FIP Model Code memberikan prediksi nilai kapasitas lentur yang terbaik untuk balok beton bertulang yang menggunakan beton mutu normal dibandingkan dengan beberapa peraturan internasional lainnya.
2. Pada balok beton bertulang yang menggunakan beton mutu tinggi, peraturan ACI 318 dapat memberikan nilai prediksi terbaik dibandingkan dengan peraturan internasional lainnya, dengan tetap menggunakan nilai α_1 yang konstan yaitu sebesar 0,85 pada setiap perbedaan mutu beton.
3. Peraturan CAN-A23.3 memberikan prediksi nilai kapasitas lentur yang lebih konservatif pada balok beton bertulang baik yang menggunakan beton mutu normal maupun beton mutu tinggi.

Saran untuk penelitian selanjutnya perlu ditambahkan jumlah benda uji balok beton bertulang, terutama untuk beton yang menggunakan mutu tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis sampaikan kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat, Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah memberikan dana hibah penelitian dosen pemula (PDP) serta ucapan terima kasih kepada Universitas Widya Kartika yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 318. (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary. In *American Concrete Institute*.
- ACI 318. (2014). *Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*. American Concrete Institute.
- ACI ITG-4.3. (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.
- Al-Kamal, M. K. (2019). Nominal Flexural Strength of High-Strength Concrete Beams. *Advances in Concrete Construction*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.12989/acc.2019.7.1.001>
- AS3600. (2001). *Australian Standard for Concrete Structures*. Standards Australia Committee.
- Bonacci, J. F., & Maalej, M. (2000). Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer for Rehabilitation of Corrosion Damaged Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 97(5), 703–711. <https://doi.org/10.14359/8805>
- CEB-FIP. (1993). CEB/FIP Model Code 1990 : Design Code. In *fib Bulletin*.
- CEB-FIP. (2010). Fib Model Code for Concrete Structures. In *fib Bulletin*.
- CSA-A23.3. (2004). Design of concrete structures. In *Canadian Standards Association*. <https://doi.org/10.1201/9781315368221-12>
- CTUBH. (2020). *The Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH)'s global study of 200-meter-and-taller building completions for 2020. Completions by Material*. Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH).
- Giduquio, M. B., Cheng, M. Y., & Wibowo, L. S. B. (2015). High-Strength Flexural Reinforcement in Reinforced Concrete Flexural Members under Monotonic Loading. *ACI Structural Journal*, 112(6), 793–804. <https://doi.org/10.14359/51688057>
- Grace, N. F., Abdel-Sayed, G., & Ragheb, W. F. (2002). Strengthening of Reinforced Concrete Beams using Innovative Ductile Composite Fiber-Reinforced Polymer Systems. *ACI Structural Journal*, 99(5), 692–700.
- Greene, C. E., & Myers, J. J. (2013). Flexural and Shear Behavior of Reinforced Concrete Members Strengthened with a Discrete Fiber-Reinforced Polyurea System. *Journal of Composites for Construction*, 17(1), 108–116. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000308](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000308)

- Hadi, M. N. S., Sarhan, M. M., & Teh, L. H. (2018). Behavior of Concrete Beams Reinforced with Steel Plates. *ACI Structural Journal*, *115*(5), 1307–1315. <https://doi.org/10.14359/51702445>
- Han, S.-J., Jang, S.-J., Kang, S.-W., & Yun, H.-D. (2012). Flexural Performance and Cracking Behavior of Expansive SHCC Beams. *15WCEE*, 25021–25025.
- Hashemi, S. H., Rahgozar, R., & Maghsoudi, A. A. (2009). Flexural Testing of high Strength Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets. *IJE Transactions B: Applications*, *22*(2), 131–146.
- Heffernan, P. J., & Erki, M. A. (2004). Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with prestressed fiber reinforced polymer. *Journal of Composites for Construction*, *8*(2), 132–140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:2\(132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(132))
- Hong, K. N., Han, J. W., Seo, D. W., & Han, S. H. (2011). Flexural Response of Reinforced Concrete Members Strengthened with Near-Surfaced-Mounted CFRP Strips. *International Journal of Physical Sciences*, *6*(5), 948–961. <https://doi.org/10.5897/IJPS10.222>
- Hong, K. N., Lee, B. H., Kim, J. H., Jang, I. Y., & Han, S. H. (2011). Flexural behavior of RC beams strengthened with Composite Beam. *International Journal of Physical Sciences*, *6*(9), 2205–2218. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.305>
- Jang, I.-Y., Park, H.-G., Kim, S.-S., Kim, J.-H., & Kim, Y.-G. (2008). On the Ductility of High-Strength Concrete Beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, *2*(2), 115–122. <https://doi.org/10.4334/ijcsm.2008.2.2.115>
- JSCE. (2010). Standard Specifications for Concrete Structures-2007 Design. In *Japan Society of Civil Engineers*. https://doi.org/10.3151/coj1975.46.7_3
- Jung, W. T., Park, Y. H., Park, J. S., Kang, J. Y., & You, Y. J. (2005). Experimental Investigation on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened by NSM CFRP Reinforcements. *Proceedings of the 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-7), New Orleans, SP-230-46*, 795–806.
- Kang, T. H. K., Kim, W., Kwak, Y. K., & Hong, S. G. (2014). Flexural Testing of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates. *ACI Structural Journal*, *112*(2), 239–240.
- Kassem, C., Farghaly, A. S., & Benmokrane, B. (2011). Evaluation of Flexural Behavior and Serviceability Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. *Journal of Composites for Construction*, *15*(5), 682–695. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000216](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000216)
- Khan, A. R., & Naseem, N. (2008). Role of U-shaped Anchorages on Performance of RC Beams Strengthened by CFRP Plates. *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*, 1–6. <https://doi.org/10.1201/9781439828403.ch176>
- Kim, H. S., & Shin, Y. S. (2011). Flexural Behavior of Reinforced Concrete (RC) Beams Retrofitted with Hybrid Fiber Reinforced Polymers (FRPs) under Sustaining Loads. *Composite Structures*, *93*(2), 802–811. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.07.013>
- Kim, S.-W., Lee, Y.-H., & Kim, K.-H. (2012). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Electric Arc Furnace Slag Aggregates. *Journal of the Korea Concrete Institute*, *11*(1), 133–138. <https://doi.org/10.4334/jkci.2012.24.3.267>
- 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. <https://doi.org/10.3130/jaabe.15.589>
- Li, L. Z., Jiang, C. J., Yu, J. T., Wang, X., & Lu, Z. D. (2019). Flexural Performance of Fire-Damaged Reinforced Concrete Beams Repaired by Bolted Side-Plating. *ACI Structural Journal*, *116*(3), 183–193. <https://doi.org/10.14359/51713319>
- Li, L. Z., Liu, X., Luo, Y., Su, M. N., & Zhu, J. H. (2019). Flexural Performance of Bolted-Side-Plated Reinforced Concrete Beams with Buckling Restraining. *ACI Structural Journal*, *116*(2), 77–87. <https://doi.org/10.14359/51712277>
- Metwally, I. M. (2011). Can Different Design Codes give the Accurate Prediction of Moment Capacities of High-Strength Concrete Members? *International Conference on Sustainable Design and Construction (ICSDC)*, 497–506.
- Nordin, H., & Täljsten, B. (2006). Concrete Beams Strengthened with Prestressed Near Surface Mounted CFRP. *Journal of Composites for Construction*, *10*(1), 60–68.
- NZS3101. (2006). Concrete structures standard. Part 1: The design of concrete structures. In *New Zealand Standards Executive* (Vol. 1).

- Rashid, M. A., & Mansur, M. A. (2005). Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure. *ACI Structural Journal*, 102(3), 462–471. <https://doi.org/10.14359/14418>
- Shin, Y.-S., & Lee, C. (2003). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates at Different Levels of Sustaining Load. *ACI Structural Journal*, 100(2), 231–239.
- SNI 2847. (2013). Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. In *Badan Standardisasi Indonesia*.
- Svecova, D., & Razaqpur, A. G. (2000). Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Prestressed Prisms. *ACI Structural Journal*, 97(5), 731–738. <https://doi.org/10.14359/8808>
- Täljsten, B. (2001). CFRP-Strengthening - Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Laminates. *Fibre Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures, FRP RCS-5 Conference*, 12.
- Whitney, C. S. (1937). Design of Reinforced Concrete Members Under Flexure or Combined Flexure and Direct Compression. *Proceedings of The American Concrete Institute*, 33(3), 483–498. <https://doi.org/10.14359/8429>
- Wight, R. G., Green, M. F., & Erki, M.-A. (2001). Prestressed FRP Sheets for Poststrengthening Reinforced Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*, 5(4), 214–220.
- Yotakhong, P. (2003). *Flexural Performance of MFMX Reinforcing Rebars in Concrete Structures*. North Carolina State University, Raleigh, NC.