

# ANALISIS DAKTILITAS BALOK BETON GRADASI DENGAN DISPARITAS MUTU BETON SERAT TEKAN DAN SERAT TARIK

M. Mirza Abdillah Pratama<sup>1,\*</sup>, Ziana Nur Afdila<sup>2</sup>, Karyadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, email: mirza.abdillah.ft@um.ac.id

<sup>2</sup> PT. Amco Jaya Tri Tunggal Pratama, email: zianaafdilla@gmail.com

<sup>3</sup> Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, email: karyadi.ft@um.ac.id

**Abstrak:** Industri semen menyumbang hingga 8% dari seluruh emisi gas karbon dioksida secara global. Beton gradasi merupakan salah satu langkah untuk mereduksi penggunaan semen pada konstruksi sekaligus untuk mengoptimalkan karakteristik mekanik elemen struktur yang direncanakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis capaian beban maksimum, defleksi, kekakuan, daktilitas, dan pola kegagalan dari balok beton gradasi dengan variasi mutu beton pada serat tekan dan serat tariknya. Balok Beton gradasi terbuat dari perpaduan antara 2 (dua) campuran mutu yang berbeda, yaitu 30-40 MPa, 30-50 MPa, dan 40-50 MPa. Pengujian lentur balok beton dilakukan pada umur 28 hari. Pola kegagalan pada balok beton gradasi pada masing-masing benda uji diamati dan dikomparasikan dengan balok beton kontrol. Hasil pengujian menunjukkan bahwa balok beton gradasi dengan mutu beton pada serat tarik yang seragam menghasilkan beban, kekakuan, dan daktilitas balok yang lebih tinggi seiring peningkatan mutu beton yang digunakan pada serat tekannya. Balok dengan mutu beton serat tekan seragam dan serat tarik yang berbeda memiliki nilai capaian beban, kekakuan, dan daktilitas balok yang semakin besar seiring peningkatan mutu beton pada bagian serat tarik balok. Lendutan balok yang dihasilkan masih memenuhi lendutan izin. Berdasarkan hal tersebut, balok beton gradasi dinyatakan memiliki kemampuan yang baik.

**Kata-kata kunci:** Balok Beton Gradasi, Kekakuan, Daktilitas, Pola Kegagalan

**Abstract:** The cement industry accounts for up to 8% of all global carbon dioxide emissions. Graded concrete is one of the steps to reduce the use of cement in construction as well as to optimize the mechanical characteristics of the planned structural elements. This study aims to analyze the maximum load performance, deflection, stiffness, ductility, and failure patterns of graded concrete beams with variations in the quality of concrete in the compression fiber and tensile fiber. Gradation beams are made from a combination of 2 (two) different quality mixtures, namely 30-40 MPa, 30-50 MPa, and 40-50 MPa. The flexural testing of the concrete beams was carried out at the age of 28 days. The failure pattern of the graded concrete beams for each test object was observed and compared with the control concrete beams. The test results show that graded concrete blocks with uniform tensile strength of concrete produce higher beam loads, stiffness, and ductility as the quality of the concrete used in compression fibers increases. Beams with uniform compression fiber and different tensile fibers have higher load, stiffness, and ductility values as the concrete quality increases in the tensile fiber portion of the beam. The resulting beam deflection still meets the allowable deflection. Based on this, the graded concrete beam is declared to have good serviceability.

**Keywords:** Graded Concrete Beam, Stiffness, Ductility, Failure Pattern

## 1. PENDAHULUAN

Salah satu material penyusun yang menentukan mutu beton adalah semen. Banyaknya permintaan beton juga akan meningkatkan kebutuhan semen sebagai bahan baku utama. Secara global, industri semen menyumbang antara 5-8% dari seluruh emisi gas karbon dioksida (Wright, 2011). Penggunaan semen dalam campuran beton dapat direduksi dengan cara mengoptimalkan karakteristik material yang digunakan sesuai dengan perilaku struktur yang telah direncanakan (Mastali et al., 2015). Salah satu langkah untuk mengoptimalkan karakteristik material beton, yaitu dengan cara melakukan gradasi mutu

(Pratama et al., 2017; Pratama et al., 2018; Pratama et al., 2019; Pratama et al., 2021).

Pada awal pengembangannya, Pratama (2015) menganalisis pengaruh teknik gradasi mutu terhadap karakteristik mekanik yang dihasilkan. Dalam penelitian tersebut, Pratama (2015) menggabungkan mutu beton 20 MPa dan 60 MPa untuk membentuk spesimen beton gradasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan beton gradasi ditentukan oleh mutu terendahnya, sedangkan mutu tertingginya meningkatkan kekakuan yang ditunjukkan dengan modulus elastisitas. Selanjutnya, Gan et al. (2015) melakukan sebuah penelitian secara eksperimental mengenai pemodelan beton gradasi dalam bentuk spesimen silinder standar. Spesimen beton yang dicetak dilakukan dengan teknik khusus dan memperoleh hasil pengujian bahwa yang serupa dengan Pratama (2015).

Vertian (2019) melakukan penelitian eksperimental di Laboratorium dengan membuat spesimen benda uji berbentuk balok dengan gradasi mutu dua lapisan dan tiga lapisan. Berdasarkan dari hasil penelitian, didapatkan bahwa balok gradasi dua lapisan menghasilkan nilai daktilitas yang lebih besar daripada balok gradasi dengan tiga lapisan. Penggunaan mutu beton yang berbeda diprediksi akan berpengaruh pada daktilitas yang dihasilkan. Daktilitas pada balok umumnya dibentuk oleh mekanisme kelelahan tulangan tarik dengan menerapkan rasio tulangan minimum. Akan tetapi, penampang dengan tulangan minimum menghasilkan berkurangnya tinggi daerah tekan pada penampang balok. Hal tersebut dikarenakan pada saat terjadi sendi plastis, regangan tulangan tarik meningkat sangat besar, sedangkan tegangan tekan pada beton sangat terbatas, dengan demikian posisi garis netral mendekati serat terluar.

Pada balok beton gradasi, serat tekan beton menggunakan mutu yang lebih tinggi daripada serat tariknya, sehingga menyebabkan serat tekan pada beton bersifat getas dan serat tariknya bersifat daktil. Beton mutu tinggi diklaim dapat menambah kekakuan struktur, sedangkan mutu yang rendah digunakan untuk mengoptimalkan kinerja tulangan baja supaya mampu berdeformasi secara panjang. Penelitian ini dilaksanakan dengan membuat benda uji berupa balok yang direncanakan memiliki mutu yang seragam dan balok dengan gradasi mutu. Balok tersebut dirancang dengan lebar 0,13 m, tinggi 0,19 m, dan bentang 1,5 m. Dalam pembuatan balok beton gradasi ini, digunakan tulangan baja berdiameter 10 mm untuk tulangan longitudinal dan diameter 6 mm untuk tulangan sengkang. Konfigurasi mutu beton yang digunakan pada penelitian balok gradasi yaitu mutu 50-40 MPa, 50-30 MPa, dan 40-30 MPa. Penggunaan teknik gradasi mutu ini diharapkan dapat menjadi alternatif untuk efisiensi penggunaan semen dalam sebuah konstruksi berbasis beton bertulang.

## 2. METODE

Penelitian dilakukan dengan urutan seperti alur penelitian dibawah ini (Gambar 1). Benda uji dikelompokkan menjadi dua, yaitu kelompok spesimen kontrol dan kelompok spesimen gradasi. Spesimen kontrol terdiri atas silinder beton, balok mutu 30 MPa dengan notasi BK30, balok mutu 40 MPa dengan notasi BK40 dan mutu 50 MPa dengan notasi BK50, sedangkan spesimen gradasi terdiri dari balok mutu 30-40 MPa dengan notasi BG 30-40, balok mutu 30-50 MPa dengan notasi BG 30-50, dan balok mutu 40-50 MPa dengan notasi BG 40-50. Spesimen baja tulangan dan silinder beton diuji menggunakan Universal Testing Machine untuk mendapatkan properties material yang digunakan pada perancangan spesimen balok beton bertulang. Spesimen balok beton bertulang dirancang untuk mengalami gagal lentur dengan memastikan bahwa spesimen dirancang kuat dalam menahan gaya geser yang bekerja. Spesimen balok diuji dengan metode pengujian lentur empat titik dan diperoleh data berupa hubungan beban dan defleksi dari awal hingga balok mengalami kehilangan kekakuan dan dinyatakan gagal.



**Gambar 1.** Tahapan Penelitian

### 3. HASIL

#### 3.1 Beban dan Lendutan

Berdasarkan hasil pencatatan pada pengujian lentur balok beton bertulang, didapatkan beban dan lendutan pada masing-masing balok. Data pertambahan dicatat melalui pembacaan instrumen data logger selama pengujian. Data beban dan defleksi balok saat retak awal, tulangan leleh, dan puncak dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Capaian Beban Maksimum dan Defleksi Spesimen Balok

Spesimen	Sampel	Retak Awal		Tulangan Leleh		Beban Puncak	
		Beban (kN)	Defleksi (mm)	Beban (kN)	Defleksi (mm)	Beban (kN)	Defleksi (mm)
BK 30	1	9,04	6,31	35,21	12,06	42,18	35,14
BK 40	1	11,55	6,48	37,23	12,07	43,08	40,97
BK 50	1	12,04	7,42	39,14	12,53	44,31	44,66
BG 30-40	1	9,86	6,38	36,69	12,07	42,44	40,81
	2	9,53	6,43	36,59	12,13	42,54	40,15
	<b>Rata-Rata</b>	<b>9,70</b>	<b>6,41</b>	<b>36,64</b>	<b>12,10</b>	<b>42,49</b>	<b>40,48</b>
BG 30-50	1	10,15	6,39	36,87	12,08	43,19	40,59
	2	10,51	6,68	36,48	12,38	43,25	41,50
	<b>Rata-Rata</b>	<b>10,33</b>	<b>6,54</b>	<b>36,68</b>	<b>12,23</b>	<b>43,22</b>	<b>41,04</b>
BG 40-50	1	11,56	6,92	37,90	12,27	43,45	41,38
	2	12,01	6,78	37,24	12,48	43,32	41,50
	<b>Rata-Rata</b>	<b>11,79</b>	<b>6,85</b>	<b>37,57</b>	<b>12,38</b>	<b>43,39</b>	<b>41,44</b>

### 3.2 Kekakuan

Nilai kekakuan balok dapat dianalisis dari data lendutan dan beban yang tercatat selama pengujian balok. Perhitungan kekakuan dapat dihitung menggunakan rumus  $K = P/\Delta$  ; di mana K adalah kekakuan, P adalah beban saat retak pertama, dan  $\Delta$  adalah nilai lendutan saat retak pertama. Hasil dari perhitungan kekakuan dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Analisis Kekakuan Balok

Spesimen	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Kekakuan (kN/mm)
BK 30	9,04	6,31	1,43
BK 40	11,55	6,84	1,69
BK 50	12,04	7,04	1,71
BG 30-40 (I)	9,86	6,38	1,55
BG 30-40 (II)	9,53	6,43	1,48
Rata-Rata	9,70	6,41	1,51
BG 30-50 (I)	10,15	6,39	1,59
BG 30-50 (II)	10,51	6,68	1,57
Rata-Rata	10,33	6,54	1,58
BG 40-50 (I)	11,66	6,92	1,68
BG 40-50 (II)	12,01	6,78	1,77
Rata-Rata	11,84	6,85	1,73

### 3.3 Daktilitas

Daktilitas lendutan dihitung dari lendutan saat kondisi ultimate dibandingkan terhadap lendutan saat tulangan leleh. Tabel 3 di bawah ini menunjukkan bahwa daktilitas balok kontrol 30 MPa sebesar 2,52, balok kontrol 40 MPa sebesar 2,94, balok kontrol 50 MPa sebesar 3,50, balok gradasi 30-40 MPa sebesar 3,24, balok gradasi 30-50 MPa sebesar 3,22, dan balok gradasi 40-50 MPa sebesar 3,27.

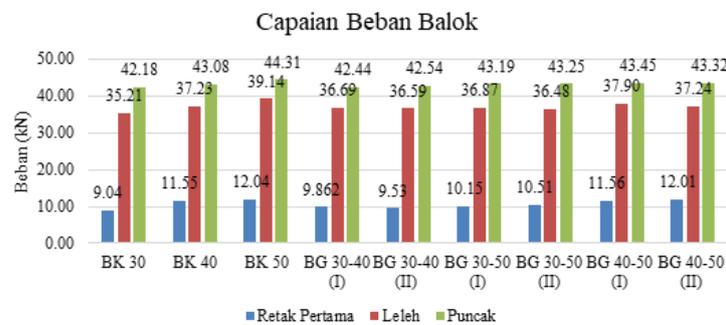
**Tabel 3.** Hasil Perhitungan Daktilitas

Spesimen	Leleh Akhir ( $\Delta u$ )	Leleh Awal ( $\Delta y$ )	Faktor Daktilitas ( $\mu = \Delta u / \Delta y$ )	Tingkat Daktilitas
MPa	mm	mm		
30	35,14	13,96	2,52	Daktail parsial
40	40,97	13,94	2,94	
50	44,66	12,76	3,50	
30-40 (I)	40,36	12,07	3,34	
30-40 (II)	40,15	12,78	3,14	
<b>Rata-Rata</b>			<b>3,24</b>	
30-50 (I)	40,59	13,37	3,04	
30-50 (II)	41,15	12,12	3,40	
Rata-Rata			3,22	
40-50 (I)	41,38	12,27	3,37	
40-50 (II)	41,50	13,11	3,17	
<b>Rata-Rata</b>			<b>3,27</b>	

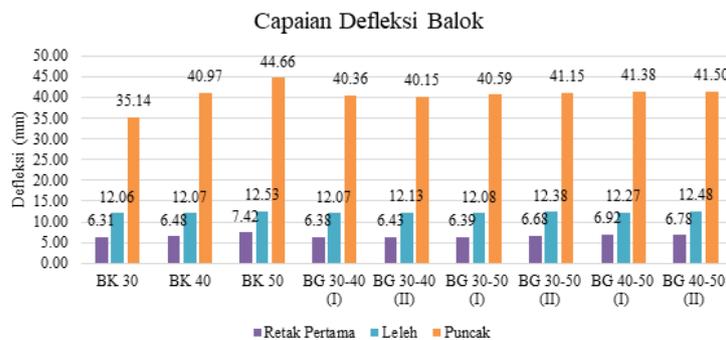
#### 4. PEMBAHASAN

##### 4.1. Beban –Defleksi Spesimen Balok Beton Gradasi

Pengujian eksperimental spesimen balok menghasilkan data beban dan defleksi yang selanjutnya digunakan untuk menganalisis hubungan beban-defleksi pada masing-masing balok kontrol dan balok gradasi. Hubungan beban-defleksi spesimen balok kontrol dan gradasi pada saat retak pertama, leleh, dan puncak dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3



**Gambar 2.** Capaian Beban



**Gambar 3.** Capaian Defleksi

#### **4.1.1. Kondisi Retak Pertama**

Gambar 2 menunjukkan hasil capaian beban balok kontrol dan balok gradasi pada saat retak pertama. Penggunaan mutu beton yang tinggi pada beton bertulang akan menghasilkan capaian beban yang semakin besar (Fajar et al., 2018). Semakin tinggi mutu beton yang digunakan pada balok beton kontrol, maka nilai capaian beban yang dihasilkan semakin besar. Balok gradasi dengan mutu beton serat tarik 30 MPa mengalami peningkatan capaian beban seiring dengan peningkatan mutu beton serat tekan. Persentase peningkatan balok kontrol adalah sebesar (30-40 MPa; 16,05%) dan (30-50 MPa; 14,20%). Peningkatan tersebut juga dijumpai pada balok gradasi berserat tarik 40 MPa. Persentase balok gradasi berserat tarik 40 MPa dengan balok kontrol didapatkan nilai sebesar (40-50 MPa; 1,70%). Balok gradasi 40-50 MPa memiliki capaian beban retak pertama yang lebih besar daripada balok gradasi 30-50 MPa dengan selisih nilai capaian sebesar 12,50%. Penambahan mutu beton pada serat tarik balok menyebabkan capaian beban yang dihasilkan meningkat karena semakin tinggi mutu beton yang digunakan menyebabkan tahanan beton terhadap tegangan tarik semakin besar.

#### **4.1.2. Kekakuan Balok**

Tabel 2 menunjukkan kekakuan balok kontrol dan balok gradasi. Capaian kekakuan balok gradasi mutu 30-40 MPa mendekati dengan kekakuan balok kontrol mutu 40 MPa sebesar 10,35%, sedangkan kekakuan balok gradasi mutu 30-50 MPa mendekati kekakuan balok kontrol 50 MPa sebesar 7,55%. Balok gradasi dengan mutu 40-50 MPa menghasilkan kekakuan yang mendekati balok kontrol 50 MPa sebesar 1,05%. Pada balok gradasi 30-50 MPa dan 40-50 MPa, kekakuan balok meningkat seiring dengan peningkatan mutu beton di bagian serat tariknya. Semakin tinggi mutu beton, semakin besar modulus elastisitas material dan semakin tinggi kekakuan strukturnya.

#### **4.1.3. Kondisi Leleh**

Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa saat kondisi leleh, balok kontrol memiliki capaian beban dan lendutan yang meningkat seiring dengan pertambahan mutu beton. Persentase peningkatan capaian beban dan lendutan pada saat kondisi leleh yaitu sebesar (30 terhadap 40 MPa; 5,43%; 0,06%), (30 terhadap 50 MPa; 10,04%; 3,75%), dan (40 terhadap 50 MPa; 4,88%; 3,69%). Hasil dari perhitungan persentase perubahan beban dan lendutan balok gradasi pada kondisi leleh dapat dilihat pada Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4, didapatkan bahwa semakin tinggi mutu beton yang digunakan pada serat tekan balok beton gradasi, maka capaian beban yang dihasilkan semakin besar. Balok gradasi BG 30-40 terhadap BG 30-50, mengalami kenaikan persentase capaian beban yaitu sebesar 0,10%. Keberadaan mutu tinggi pada serat tekan mampu mening-

katkan capaian beban pada saat tulangan leleh. Kondisi tersebut termasuk dalam kondisi non linear, sehingga mutu beton pada serat tekan menentukan kinerja dari balok. Pada penelitian ini balok gradasi mutu 30-40 MPa dan balok gradasi mutu 30-50 MPa mengalami kenaikan capaian beban yang tidak signifikan, sehingga mengakibatkan kondisi underreinforced, di mana balok tersebut belum memperhatikan rasio tulangan minimum.

Hasil capaian beban dan lendutan pada kasus yang berbeda mengalami peningkatan sebesar (BG 30-50; 36,68 kN; 12,23 mm) dan balok (BG 40-50; 37,57 kN; 12,38 mm). Nilai capaian tersebut meningkat secara signifikan yaitu sebesar 2,38%. Apabila dibandingkan dengan BK 50 nilai tersebut mengalami penurunan capaian beban dan lendutan berturut-turut sebesar (6,30%; 2,39%), (4,01%; 1,24%). Hal ini berlaku sama pada kasus BG 30-40 yang mengalami penurunan beban dan lendutan berturut-turut (1,58%; 0,24%) terhadap BK 40. Capaian defleksi yang dihasilkan tidak terpaut secara signifikan. Hal ini terjadi karena pada balok beton gradasi menggunakan desain tulangan yang seragam. Mutu beton berpengaruh pada jumlah tulangan desain balok beton bertulang.

**Tabel 4.** Perbandingan Beban dan Lendutan Balok Gradasi Pada Kondisi Leleh

Spesimen	Beban (kN)			Defleksi (mm)		
	Nilai	Selisih	Persentase (%)	Nilai	Selisih	Persentase (%)
BK 30	35,21	2,02	5,43	12,06	0,01	0,06
BK 40	37,23			12,07		
BK 30	35,21	2,02	5,16	12,06	0,47	3,75
BK 50	39,14			12,53		
BK 40	37,23	1,91	4,88	12,07	0,46	3,69
BK 50	39,14			12,53		
BK 30	35,21	1,43	4,06	12,06	0,04	0,30
BG 30-40	36,64			12,10		
BK 30	35,21	1,47	4,16	12,06	0,17	1,41
BG 30-50	36,68			12,23		
BK 40	37,23	-0,59	-1,58	12,07	0,03	0,24
BG 30-40	36,64			12,10		
BK 50	39,14	-2,47	-6,30	12,53	-0,30	-2,39
BG 30-50	36,68			12,23		
BK 50	39,14	-1,57	-4,01	12,53	-0,16	-1,24
BG 40-50	37,57			12,38		
BG 30-40	36,64	0,03	0,09	12,10	0,13	1,09
BG 30-50	36,68			12,23		
BG 30-40	36,64	0,93	2,47	12,10	0,28	2,25
BG 40-50	37,57			12,38		
BG 30-50	36,68	0,90	2,38	12,23	0,14	1,17
BG 40-50	37,57			12,38		

#### 4.1.4. Kondisi Puncak Balok Beton Bertulang

Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa capaian beban dan lendutan pada saat beban puncak mengalami peningkatan seiring dengan penambahan mutu beton pada balok. Persentase peningkatan capaian beban dan lendutan pada kondisi beban puncak yaitu sebesar (30 terhadap 40 MPa; 2,09%; 14,22%), (30 terhadap 50 MPa; 4,81%; 21,31%), dan (40 terhadap 50 MPa; 2,78%; 8,27%). Hasil dari perhitungan persentase perubahan beban dan lendutan balok gradasi pada kondisi puncak dapat dilihat pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Perbandingan Beban dan Lendutan Balok Gradasi Pada Kondisi Puncak

Spesimen	Beban (kN)			Defleksi (mm)		
	Puncak	Selisih	Persentase (%)	Puncak	Selisih	Persentase (%)
BK 30	42,18	0,90	2,09	35,14	5,83	14,22
BK 40	43,08			40,97		
BK 30	42,18	2,13	4,81	35,14	9,52	21,31
BK 50	44,31			44,66		
BK 40	43,08	1,23	2,78	40,97	3,69	8,27
BK 50	44,31			44,66		
BK 30	42,18	0,31	0,73	35,14	5,11	14,54
BG 30-40	42,49			40,25		
BK 30	42,18	1,04	2,47	35,14	5,73	16,30
BG 30-50	43,22			40,87		
BK 40	43,08	-0,59	-1,37	40,97	-0,72	-1,75
BG 30-40	42,49			40,25		
BK 50	44,31	-1,09	-2,46	44,66	-3,79	-8,49
BG 30-50	43,22			40,87		
BK 50	44,31	-0,92	-2,09	44,66	-3,22	-7,21
BG 40-50	43,39			41,44		
BG 30-40	42,49	0,73	1,69	40,25	0,62	1,51
BG 30-50	43,22			40,87		
BG 30-40	42,49	0,90	2,07	40,25	1,19	2,87
BG 40-50	43,39			41,44		
BG 30-50	43,22	0,17	0,38	40,87	0,57	1,37
BG 40-50	43,39			41,44		

Berdasarkan Tabel 5, didapatkan bahwa semakin tinggi mutu beton yang digunakan pada serat tekan balok beton gradasi, maka capaian beban yang dihasilkan semakin besar. Balok gradasi BG 30-40 terhadap BG 30-50, mengalami kenaikan persentase capaian beban yaitu sebesar 1,73%. Capaian beban pada balok beton gradasi meningkat dikarenakan penggunaan mutu tinggi pada bagian serat tekan balok mampu meningkatkan tahanan balok dalam menahan beban lebih besar sehingga mampu menahan terjadinya laju retak yang semakin besar.

Balok gradasi dengan mutu serat tekan seragam dan serat tarik yang berbeda menghasilkan nilai capaian beban dan lendutan sebesar (BG 30-50; 43,22 kN; 40,87 mm) dan balok

(BG 40-50; 43,39 kN; 41,44 mm). Nilai capaian tersebut mengalami peningkatan sebesar 0,90%. Capaian beban yang dihasilkan tidak mengalami peningkatan secara signifikan, dikarenakan pada saat kondisi puncak balok mendekati kondisi ultimate di mana balok sudah tidak mampu menahan beban yang semakin besar. Apabila dibandingkan dengan BK 50 nilai capaian beban BG 30-50 dan BG 40-50 mengalami penurunan capaian beban dan lendutan berturut-turut sebesar (2,46%; 3,79), (2,09%; 8,49%). Hal serupa terjadi pada BG 30-40 yang mengalami penurunan beban dan lendutan berturut-turut sebesar (1,37%; 1,75) terhadap BK 40. Penggunaan mutu beton yang semakin tinggi pada bagian serat tekan balok beton gradasi menyebabkan capaian defleksi yang dihasilkan mengalami penurunan.

#### 4.2 Daktilitas

Dari hasil perhitungan daktilitas pada Tabel 3, menunjukkan bahwa daktilitas rerata balok kontrol mengalami peningkatan dengan bertambahnya mutu beton yang digunakan. Balok beton gradasi dengan mutu beton 30-50 MPa, memiliki nilai daktilitas lebih kecil daripada balok gradasi dengan mutu 30-40 MPa dengan kenaikan sebesar 0,83%. Apabila dibandingkan dengan balok gradasi mutu 30-40 MPa terhadap 40-50 MPa, balok beton gradasi mengalami kenaikan daktilitas yang lebih kecil yaitu sebesar 0,8%. Balok beton gradasi mengalami kenaikan yang tidak signifikan, dikarenakan penggunaan mutu beton yang lebih tinggi di bagian serat tekannya dimungkinkan memberikan pengaruh terhadap kekakuan balok beton gradasi yang dihasilkan. Menurut Tata Cara Perencanaan Gempa Untuk Bangunan Gedung SNI 1726 2012, tingkat daktilitas ( $\mu$ ) struktur meliputi elastik penuh (nilai  $\mu = 1$ ), daktail parsial (nilai  $\mu$  berkisar 1,5 sampai 5,0), dan daktail penuh (nilai  $\mu \geq 5,3$ ). Hasil pengujian menunjukkan bahwa balok kontrol dan balok gradasi memiliki nilai  $\mu > 1$  yang artinya balok masuk dalam tahap plastis di mana tidak dapat kembali ke bentuk awal, namun masih mampu menahan beban setelah terjadinya pelelehan.

#### 4.3 Pola Kegagalan Spesimen Balok

Kegagalan pada balok bertulang terjadi akibat penurunan daya perlawanan terhadap beban eksternal yang bekerja. Beban yang mengakibatkan terjadinya keruntuhan berbeda pada setiap spesimen balok. Pada penelitian ini, balok beton kontrol dan balok beton gradasi direncanakan mengalami keruntuhan lentur. Pola kegagalan yang terjadi pada spesimen balok kontrol dan balok gradasi diawali dengan gagal lentur. Kegagalan lentur ditandai dengan terjadinya retak vertikal yang memanjang dari serat tarik balok, lurus mengarah garis sumbu netral penampangnya. Penggunaan tulangan polos pada spesimen balok beton kontrol dan balok beton gradasi memberikan pengaruh pada lekatan antara tulangan dengan beton. Menurut Wu et al. (2020), tegangan lekat baja tulangan ulir jauh lebih besar dibandingkan dengan lekatan pada tulangan polos. Secara keseluruhan balok mengalami retak pada daerah tarik, yang diakibatkan oleh tegangan utama tarik. Hal ini sesuai dengan Sarfarazi et al. (2016), yang menyatakan bahwa kekuatan tarik beton kira-kira hanya  $\pm 1/10$

dari kuat tekan beton, sehingga cenderung terjadi keretakan akibat tegangan utama tarik.

#### **4.4 Kemampuan Layan Sistem Struktur**

Tingkat layan pada balok beton bertulang dapat diukur berdasarkan capaian lendutan yang dihasilkan. Apabila diaplikasikan pada elemen struktur, batas lendutan yang digunakan senilai  $L/180$  (Setiawan, 2016). Semakin besar capaian beban pada balok semakin besar lendutan yang dihasilkan. Capaian lendutan pada balok beton bertulang dibatasi agar tingkat layan dalam menerima beban kerja mempunyai kekakuan yang cukup. Selama lendutan yang dihasilkan belum mencapai batas lendutan izin maka balok tersebut dapat dikatakan memiliki kemampuan layan yang baik.

Balok beton gradasi memiliki dua mutu yang berbeda dalam satu penampang balok. Hal ini dapat memberikan kekakuan yang lebih sehingga defleksi yang dihasilkan mengalami penurunan. Penggunaan mutu beton yang lebih tinggi pada bagian serat tekan balok akan menghasilkan capaian defleksi yang lebih kecil, karena penggunaan mutu tinggi pada bagian serat tekan balok mampu meningkatkan tahanan balok dalam menahan beban lebih besar sehingga dapat menahan terjadinya laju retak yang semakin besar. Oleh karena itu, penggunaan balok beton gradasi mampu meningkatkan kekakuan pada balok sehingga lendutan yang terjadi mengalami penurunan dan memiliki kemampuan layan yang lebih baik.

### **5. SIMPULAN**

Berdasarkan rumusan masalah serta hasil dan pembahasan tentang “Studi Eksperimental Daktilitas Pada Balok Beton Gradasi”, maka dapat disimpulkan bahwa Balok gradasi saat kondisi retak awal, mengalami peningkatan capaian beban seiring dengan penambahan mutu beton pada bagian serat tekan dan serat tariknya. Lendutan pada saat retak awal yang dihasilkan balok gradasi hampir sama dengan lendutan balok kontrol yaitu sebesar 6,6 mm. Kekakuan balok beton gradasi meningkat seiring dengan peningkatan mutu beton di bagian serat tarik dan serat tekannya. Semakin tinggi mutu beton, semakin besar modulus elastisitas material dan semakin tinggi kekakuan strukturnya.

Balok gradasi saat kondisi leleh, mengalami peningkatan capaian beban seiring dengan penambahan mutu beton pada bagian serat tekan dan serat tariknya. Beban maksimum yang dicapai balok gradasi dengan mutu beton serat tarik seragam lebih tinggi 0,10% dari balok kontrol, sedangkan beban maksimum yang dicapai balok gradasi dengan mutu beton serat tekan seragam lebih tinggi 2,38% dari balok kontrol. Balok gradasi saat kondisi puncak, mengalami peningkatan capaian beban dan lendutan seiring dengan penambahan mutu beton pada bagian serat tekan dan serat tariknya. Beban maksimum yang dicapai balok gradasi dengan mutu beton serat tarik seragam lebih tinggi 1,73% dari balok kontrol, sedangkan beban maksimum yang dicapai balok gradasi dengan mutu beton serat tekan seragam lebih tinggi 0,90% dari balok kontrol.

Daktilitas lendutan yang dihasilkan balok kontrol dan balok gradasi berkisar antara 2,52 – 3,27 dan tergolong daktail parsial. Penggunaan balok gradasi dapat meningkatkan nilai daktilitas balok beton bertulang. Daktilitas rata-rata tertinggi dimiliki oleh balok gradasi 40-50 MPa. Pola kegagalan yang terjadi pada spesimen balok kontrol dan balok gradasi diawali dengan gagal lentur. Kegagalan lentur ditandai dengan terjadinya retak vertikal yang memanjang dari serat tarik balok, lurus mengarah garis sumbu netral penampangnya.

## 6. DAFTAR RUJUKAN

- Gan, B. S., Aylie, H. and Pratama, M. M. A. (2015) 'The Behavior of Graded Concrete, an Experimental Study', *Procedia Engineering*, 125, pp. 885–891. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.076.
- Mastali, M. et al. (2015) 'Experimental assessment of functionally graded reinforced concrete (FGRC) slabs under drop weight and projectile impacts', *Construction and Building Materials*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.153.
- Pratama, M. M. A. An Experimental Study and Finite Element Approach to the Behavior of Graded Concrete, Tesis, Semarang: Universitas Diponegoro, DOI: 10.13140/RG.2.1.4082.4568
- Pratama, M. M. A. et al. (2017) 'Effect of concrete strength gradation to the compressive strength of graded concrete, a numerical approach', *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 1887(1), p. 20029. doi: 10.1063/1.5003512.
- Pratama, M. M. A. et al. (2018) 'Modulus elasticity of the graded concrete, a preliminary research', *MATEC Web Conf.*, 195. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819501005>.
- Pratama, M. M. A. et al. (2019) 'A Numerical Analysis of The Modulus of Elasticity of The Graded Concrete', 2nd International Conference on Vocational Education and Training (ICOVET 2018) [Internet]. doi: 10.2991/icovet-18.2019.29.
- Pratama, M. M. A. et al. (2019) 'Finite element analysis of the bending moment-curvature of the double-layered graded concrete beam', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 494(1). doi: 10.1088/1757-899X/494/1/012064.
- Pratama, M. M. A. et al. (2019) 'Flexural behaviour of the functionally graded concrete beams using two-layers and three-layers configuration', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 669, p.012054. doi: 10.1088/1757-899X/669/1/012054.
- Pratama, M. M. A. et al. (2019) 'Numerical and experimental investigation on the shear resistance of functionally graded concrete (FGC) beams', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 669, p.012055. doi: 10.1088/1757-899X/669/1/012055.
- Pratama, M. M. A. et al. (2021) 'Potential use of graded concrete as structural elements of multi-storey buildings', in *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing Ltd, p. 12040. doi: 10.1088/1742-6596/1833/1/012040.
- Pratama, M. M. A. et al. (2021) 'Effect of concrete strength configuration on the struc

- tural behaviour of reinforced graded concrete beams’, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing Ltd, p. 12017. doi: 10.1088/1742-6596/1808/1/012017.
- Sarfazai, V. et al. (2016) ‘A new approach for measurement of tensile strength of concrete’, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. doi: 10.3311/PPci.8328.
- Setiawan, A. (2016) ‘Perancangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847 : 2013’, in Erlangga.
- Standar Nasional Indonesia (SNI).2012. Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung/ SNI 03-1726-2012. Bandung : PUSKIM.
- Vertian, T. 2019. Analisis Perbandingan Momen Kurvatur Balok Gradasi 2 Lapis dan 3 Lapis. Skripsi tidak diterbitkan. Malang: Universitas Negeri Malang Fakultas Teknik Sipil.
- Wright, M. A. (2011). Carbon Dioxide Equivalent Emissions from the Manufacture of Concrete in South Africa. (March).
- Wu, C. H. et al. (2020) ‘Research on the Bond Strength of Concrete Containing Fly Ash’, *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*. doi: 10.6652/JoCICHE.202006\_32(4).0005.