

PERILAKU LENTUR BALOK BETON GRADASI DENGAN MENGGUNAKAN TULANGAN MAKSIMUM

M. Mirza Abdillah Pratama¹

¹) Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, Indonesia
Jl. Semarang No. 5, Sumbarsar, Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145, Indonesia

email: mirza.abdillah.ft@um.ac.id

Diterima : 22 Juli 2021
Direvisi : 8 September 2021

Disetujui : 17 Oktober 2021
Diterbitkan : 26 November 2021

Abstract: Previous research has proven that graded concrete can be applied as an optimization on construction work. Global provisions recommend structural planners design ductile structural elements. However, the use of maximum reinforcement ratios is often encountered due to limitations on the dimensions of the structural elements. This study aims to observe the behaviour of graded concrete beams using a maximum reinforcement ratio. The graded concrete beam specimen was made by layering the concrete mix of 40 MPa on the compressive fibre and the concrete mix of 20 MPa on the tensile fibre of the beam. The test was conducted when the beam specimen is 28 days old. The results of this study are 1) At rupture, graded concrete has lower crack resistance; 2) At yield point, the presence of higher strength concrete in the compression fibre increases the load capacity so that the yield rate of reinforcement also increases; 3) At the ultimate condition, as the reinforcement of graded concrete in corresponding to the lower concrete strength, the resulting load performance increases accompanied by a decrease in the deflection. In graded concrete specimens in which the reinforcement is designed to correspond to higher concrete strength, the resulting load performance decreases and the deflection increases; 4) The presence of higher strength concrete in the compression fibres of the graded concrete beam increases the stiffness of structural elements; 5) The crack pattern occurring in the overall specimen is shear cracks, which form open diagonal cracks..

Keywords : Reinforced Concrete Beams; Graded Concrete Beams; Load; Deflection; Crack Pattern.

Abstrak: Riset terdahulu membuktikan beton gradasi dapat diterapkan sebagai langkah optimasi pekerjaan konstruksi. Provisi selalu merekomendasikan perencana struktur untuk mendesain elemen struktur bersifat daktil. Namun, penggunaan rasio pembesian maksimum kerap dijumpai karena adanya pembatasan dimensi elemen direncanakan. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh perilaku balok beton gradasi dengan desain tulangan maksimum bila dibandingkan terhadap spesimen kontrol. Spesimen balok beton gradasi dibuat dengan meletakkan mutu beton 40 MPa pada bagian serat tekan dan mutu beton 20 MPa pada bagian serat tarik balok. Pengujian dilakukan ketika spesimen balok berumur 28 hari. Hasil penelitian ini, yaitu: 1) Pada kondisi retak pertama, beton gradasi memiliki tahanan retak yang lebih rendah; 2) Pada kondisi leleh, adanya beton mutu tinggi pada serat tekan meningkatkan kapasitas beban sehingga tingkat kelelahan tulangan juga semakin meningkat; 3) Pada kondisi ultimate, apabila pembesian spesimen gradasi dirancang terhadap mutu beton rendah, capaian beban yang dihasilkan semakin meningkat diiringi dengan penurunan nilai defleksi. Pada spesimen gradasi yang pembesannya dirancang terhadap mutu beton tinggi, capaian beban yang dihasilkan mengalami penurunan dan defleksinya meningkat; 4) Adanya beton mutu tinggi pada serat tekan balok beton gradasi dapat meningkatkan kekakuan elemen struktur; 5) Pola retak yang terjadi secara keseluruhan mengalami retak geser, yang membentuk retak diagonal terbuka.

Kata kunci : Balok Beton Bertulang; Balok Beton Gradasi; Beban Maksimum; Defleksi; Pola Retak.

1. PENDAHULUAN

Riset guna menginvestigasi kebermanfaatan beton gradasi telah dilakukan dalam 5 tahun terakhir. Balok beton gradasi mampu meningkatkan kapasitas struktur dan mengoptimasi biaya konstruksi. Pengaplikasian beton gradasi pada balok dilakukan dengan meletakkan campuran beton mutu tinggi pada serat tekan dan beton mutu rendah pada serat tarik. Penerapan gradasi mutu beton tersebut mampu mereduksi kebutuhan material semen serta menambah kekakuan struktur sehingga dapat menyamai kinerja yang dihasilkan dari balok beton mutu tinggi konvensional [1]–[7]. Potensi yang dimiliki oleh balok beton gradasi mendorong penulis untuk menginvestigasi lebih lanjut terkait karakteristik mekanik yang dimiliki. Pengaplikasian tulangan maksimum pada penelitian ini dilatarbelakangi oleh belum adanya literatur yang relevan, khususnya pada lingkup material dan struktur beton gradasi. Periset selama ini lebih berkonsentrasi pada perilaku balok beton bertulang dengan desain tulangan minimum. Hal tersebut berkaitan dengan adanya ketentuan desain agar terpenuhi perilaku daktail. Pada kenyataannya, tahapan desain bangunan sangat dimungkinkan untuk menggunakan tulangan maksimum, hal tersebut dikarenakan adanya batasan dimensi penampang elemen bangunan karena pertimbangan arsitektural. Pada balok konvensional, penggunaan tulangan maksimum masih diperkenankan dengan tetap memperhatikan nilai regangan yang terjadi pada tulangan tarik serat terluar agar tetap memenuhi ketentuan yang ditetapkan dalam code [8], [9]. Untuk aplikasi lebih lanjut, balok beton gradasi dengan tulangan maksimum diharapkan mampu bersifat lebih daktail dibandingkan dengan balok beton bertulang konvensional mutu tinggi. Hal tersebut disebabkan oleh adanya kontribusi mutu tinggi pada bagian serat tekan balok beton gradasi sehingga memberikan pengaruh yang positif terhadap peningkatan rasio daktilitas yang dihasilkan oleh balok beton gradasi [10]–[12]. Harapannya, balok beton gradasi dengan desain penulangan maksimum dapat mengatasi permasalahan yang dihadapi oleh balok beton dengan mutu tinggi yang cenderung mengalami gagal getas (*brittle*). Spesimen balok yang digunakan dalam penelitian ini disiapkan dalam dua jenis ukuran yang berbeda yaitu 1720 mm x 260 mm x 130 mm dan 1400 mm x 195 mm x 130 mm. Data yang dihasilkan, khususnya terdiri dari data beban dan defleksi akan dibandingkan dengan balok konvensional.

2. METODE PENELITIAN

Proporsi Bahan dan Campuran

Mutu beton yang digunakan pada penelitian ini, yaitu mutu beton 20 MPa dan mutu beton 40 MPa. Proporsi campuran beton baik mutu beton 20 MPa

maupun mutu beton 40 MPa dapat dilihat pada **Tabel 1**. Bahan yang digunakan dalam campuran beton meliputi semen portland biasa (Tipe I dengan merek Semen Gresik), pasir Lumajang dan *superplasticizer* (SP). Karakteristik agregat yang digunakan disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 1. Proporsi campuran beton per- m³

Kuat Rencana (MPa)	Air (kg)	Semen (kg)	Faktor air semen (%)	Agregat		SP (kg)
				Kerikil (kg)	Pasir (kg)	
40	140	760	0.21	854	681	2.64
20	154	300	0.51	899	1030	1.04

Tabel 2. Karakteristik agregat

Proporsi	Kerikil	Pasir
Ukuran agregat maksimum (mm)	20	-
Kandungan lumpur (%)	3	6
Penyerapan air (%)	4	4
Rasio volume	0.34	0.25
Berat jenis jenuh	2.56	2.63

Desain Balok Beton Bertulang

Pengelompokan spesimen balok terbagi menjadi dua, yaitu spesimen balok kontrol dan spesimen balok beton gradasi, yang keduanya sama-sama didesain dengan penggunaan penulangan maksimum (**Tabel 3**). Kode BG adalah balok beton gradasi sedangkan BR merupakan balok kontrol. Kode 1/2 dan 2/3 menunjukkan besaran rasio dimensi antara lebar balok dan tinggi penampang balok. Konfigurasi mutu beton yang digunakan pada balok beton konvensional adalah mutu beton yang seragam, sedangkan untuk balok beton gradasi dimodelkan dengan menempatkan mutu beton 20 MPa pada bagian serat tarik dan mutu beton 40 MPa pada bagian serat tekan. Penentuan luas tulangan yang digunakan pada penelitian ini disesuaikan terhadap desain awal penelitian ini yang mengadopsi penggunaan tulangan maksimum. Sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2019 [8], spesimen balok pada penelitian ini menggunakan tulangan maksimum dengan nilai rasio tulangan maksimum di bawah nilai rasio tulangan balanced.

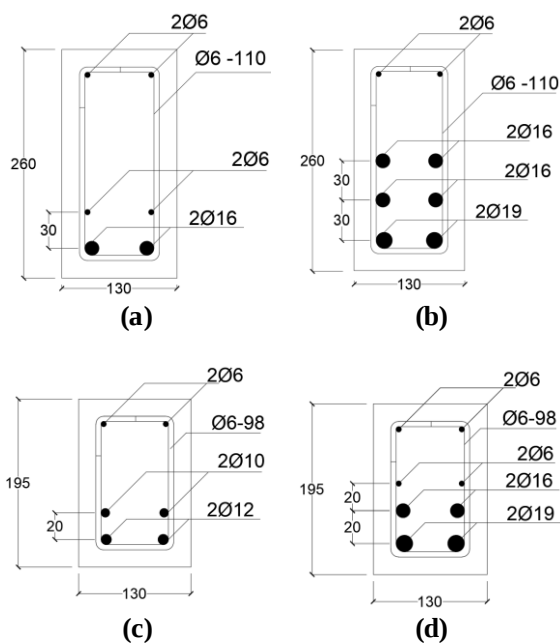
Persentase tulangan yang digunakan pada tiap spesimen balok didasarkan atas desain balok terhadap mutu beton 20 MPa dan desain balok terhadap mutu beton 40 MPa. Berdasarkan perhitungan nilai rasio penulangan balok, spesimen balok yang didesain terhadap mutu beton 20 MPa memiliki rasio penulangan sebesar 0.0159, sedangkan spesimen yang didesain terhadap mutu 40 MPa memiliki rasio penulangan sebesar 0.0478. Untuk memenuhi kebutuhan luas

tulangan tersebut, digunakan 4 (empat) tulangan baja polos berdiameter 19 mm, 16 mm, 12 mm, 10 mm, maupun 6 mm. Kuat leleh masing-masing diameter yang diperoleh berturut-turut adalah 313 MPa, 312 MPa,

517 MPa, 570 MPa, dan 507 MPa. Gambaran penulangan balok pada daerah tumpuan pada tiap spesimen dibuat beragam, dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Tabel 3. Detail spesimen

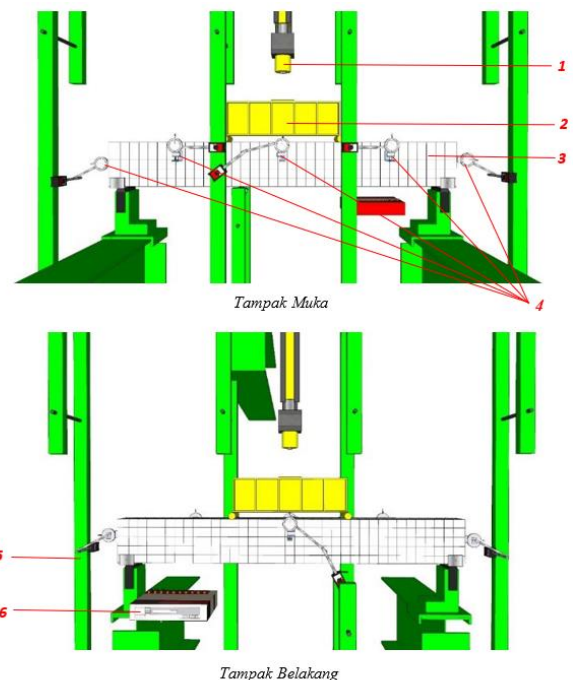
Specimen	Bentang (mm)	Lebar (mm)	Tinggi Efektif (mm)	Tinggi (mm)	Rasio Pembesian
BG-1/2-20	1720	130	226	240	0.0159
BG-1/2-40	1720	130	224.5	240	0.0478
BG-2/3-20	1400	130	163	195	0.0159
BG-2/3-40	1400	130	159.5	195	0.0478
BR-1/2-20	1720	130	226	240	0.0159
BR-2/3-20	1720	130	224.5	240	0.0159
BR-1/2-40	1400	130	163	195	0.0478
BR-2/3-40	1400	130	159.5	195	0.0478



Gambar 1. Desain tulangan balok (a) BR-1/2-20 dan BG-1/2-20 (b) BR-1/2-40 dan BG-1/2-40 (c) BR-2/3-20 dan BG-2/3-20 (d) BR-2/3-40 dan BG-2/3-40

Prosedur Pengujian Balok

Peralatan pendukung dalam pengujian balok beton meliputi *dial gauge*, *data logger*, *hydraulic jack*, *loading frame*, *loading head*, *transducer*, tumpuan sendi dan rol dan *load cell*. *Dial gauge* berfungsi sebagai alat ukur besarnya lendutan yang terjadi pada balok secara manual pada setengah bentang dan seperempat bentang balok.



Keterangan:

1. Load cell;
2. Beam spreader;
3. Spesimen;
4. Dial gauge;
5. Loading frame;
6. Data logger

Gambar 2. Set-up pengujian balok

Pada pengujian ini, *dial gauge* diletakkan pada sisi balok untuk menghindari adanya kegagalan mendadak pada balok yang menyebabkan instrumen tertimpa. Penempatan *dial gauge* pada $\frac{1}{2}$ dan $\frac{3}{4}$ bentang bertujuan untuk mengantisipasi adanya lendutan yang tidak simetris pada balok sehingga data dapat digunakan untuk validasi dan perbaikan. Bacaan dari *load cell* dan *transducer* pada spesimen balok akan tercatat pada *data logger*. *Hydraulic jack* digunakan untuk menciptakan beban terpusat pada balok beton saat pengujian

berlangsung. *Loading frame* berperan sebagai tempat untuk memasang benda uji balok dan instrumen pengujian lainnya. *Transducer* digunakan untuk merekam besarnya lendutan terjadi pada pada setengah bentang dan seperempat bentang balok akibat beban yang diterima. *Load cell* pada penelitian ini difungsikan untuk mencatat beban yang bekerja pada spesimen balok selama proses pengujian. Setup pengujian balok ditunjukkan pada **Gambar 2**.

Pengamatan Pola Retak

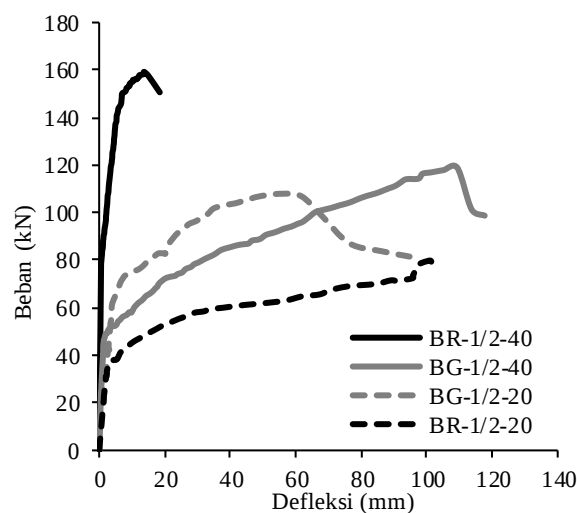
Pengamatan pola retak dilakukan dengan mengamati retak yang terjadi pada balok, serta dengan menggunakan metode dokumentasi. Retak yang terjadi pada balok disalin dengan menggunakan form pola retak yang sudah disiapkan terlebih dahulu. Hasil pengamatan dan komparasi tersebut digunakan sebagai data pendukung pada saat menganalisis data.

3. HASIL PEMBAHASAN

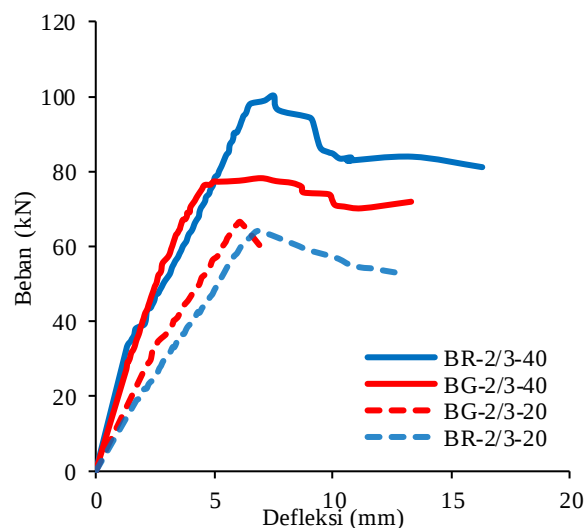
Beban dan Defleksi

Perilaku beban dan defleksi yang dihasilkan oleh masing-masing spesimen balok ditunjukkan pada **Gambar 3** sampai dengan **4**. Defleksi yang ditampilkan adalah defleksi pada tengah bentang. Adanya penggunaan beton mutu rendah pada balok beton gradasi menyebabkan kekuatan material dalam menahan retak lebih rendah jika dikomparasikan terhadap spesimen kontrol yang didesain dengan menggunakan beton mutu tinggi. Hal tersebut terkonfirmasi oleh balok beton gradasi dengan rasio dimensi 1/2, jika dibandingkan terhadap balok kontrol dengan rasio 1/2 yang didesain terhadap mutu beton 40 MPa. Namun demikian, hasil yang berbeda ditunjukkan pada balok beton gradasi dengan rasio dimensi 2/3 apabila dibandingkan dengan balok kontrolnya yang didesain terhadap mutu beton 40 MPa. Hal tersebut disebabkan oleh dijumpainya gelembung udara pada spesimen kontrol. Adanya ketidaksempurnaan kondisi permukaan spesimen tersebut menyebabkan momen *rupture* (M_{cr}) pada balok kontrolnya semakin berkurang. Hal tersebut selaras dengan penelitian Ajeel [13] yang membuktikan bahwa adanya rongga pada balok mereduksi kapasitas beban sekitar 13 hingga 23% dari kekuatan ultimit yang direncanakan. Faktor lain yang menyebabkan perbedaan tren tersebut adalah adanya potensi slip antara tulangan dan beton yang terjadi di awal pembebanan. Penggunaan tulangan polos pada spesimen balok menyebabkan lemahnya lekatan antara tulangan dan beton sehingga mengakibatkan bacaan awal defleksi baloknya menjadi besar oleh karena tidak adanya friksi antara tulangan dan beton. Menurut Slowik [14], ikatan antara beton dan batang baja mempengaruhi intensitas tegangan yang terjadi di

sekitar tulangan. Adanya pola ulir pada tulangan dapat memperlambat terjadinya proses pembentukan retakan. Oleh karena itu, untuk penelitian selanjutnya penggunaan tulangan ulir dapat dipertimbangkan, mengingat penelitian ini menggunakan jenis tulangan polos. Pengaplikasian tulangan ulir diharapkan mampu memperkuat friksi yang terjadi antara tulangan dan beton sehingga mekanisme perambatan retak pada balok mampu diminimalisir.



Gambar 3. Grafik hubungan beban – defleksi balok dengan rasio dimensi 1/2



Gambar 4. Grafik hubungan beban – defleksi dengan rasio dimensi 2/3

Berdasarkan **Gambar 3**, dapat dilihat bahwa BR-1/2-40 memiliki daktilitas yang paling kecil dibandingkan spesimen lainnya. Rendahnya nilai daktilitas tersebut dapat diindikasikan dengan singkatnya fase peralihan antara terjadinya kelelahan tulangan baja dan tercapainya kondisi ultimate. Hal tersebut disebabkan karena penggunaan mutu beton 40

MPa disertai dengan rasio pembesian yang besar. Konfigurasi tersebut menyebabkan tulangan tidak dapat meregang maksimal dan mengarahkan balok untuk berperilaku getas. Kondisi ini perlu dihindari karena memiliki tingkat keselamatan yang rendah bila diterapkan pada konstruksi.

Pada kondisi leleh, secara keseluruhan kapasitas beban balok beton gradasi lebih kecil jika dibandingkan dengan balok kontrol mutu tinggi. Pada balok beton gradasi, mutu beton yang digunakan pada serat tarik yaitu 20 MPa dan pada bagian serat tekan menggunakan 40 MPa, sedangkan balok kontrol 40 MPa seluruhnya bagiannya menggunakan mutu seragam 40 MPa. Gao [15] menunjukkan bahwa semakin meningkatnya mutu beton yang digunakan, maka semakin meningkat pula kapasitas beban yang mampu ditahan oleh balok. Oleh karena itu, tingkat kelelahan yang dihasilkan juga semakin meningkat.

Berdasarkan **Tabel 4**, pada kondisi *ultimate* dijumpai balok BG-1/2-40 memiliki kapasitas yang lebih besar 10.15% dalam menerima beban jika dibandingkan dengan spesimen BG-1/2-20. Namun dari segi defleksi yang dihasilkan, nilai defleksi balok BG-1/2-40 lebih besar 95.86% jika dibandingkan spesimen BG-1/2-20. Capaian beban balok BG-2/3-40 pada kondisi *ultimate*, melampaui balok BG-2/3-20 dengan selisih persentase sebesar 17.65%. Dari segi defleksi yang dihasilkan, nilai defleksi balok BG-2/3-40 mengalami peningkatan sebesar 14.07% jika dibandingkan balok BG-2/3-20. Hal tersebut dikarenakan adanya efek peningkatan rasio penulangan balok. Peningkatan rasio penulangan balok yang didesain terhadap mutu beton 20 MPa ke mutu beton 40 MPa berbanding lurus terhadap capaian beban yang dihasilkan. Hal tersebut selaras dengan temuan yang telah dilakukan oleh Ashour [16]. Ashour [16] mengatakan bahwa kapasitas lentur balok merupakan fungsi dari nilai rasio tulangan yang digunakan, di mana semakin besar nilai rasio tulangan yang digunakan maka semakin besar pula nilai kapasitas lentur balok. Pada konsep desain balok beton bertulang, nilai rasio tulangan memiliki andil dalam mekanisme keruntuhan balok. Nilai rasio tulangan berkontribusi pada saat beton tidak lagi mampu menahan gaya tarik di area timbulnya retak. Gaya tarik akan ditransfer ke tulangan baja dengan harapan tulangan baja mampu memikul gaya tarik sehingga efektivitas penampang beton menjadi bertambah. Jika beban terus mengalami peningkatan, pada akhirnya baja tulangan akan mencapai fase kelelahannya dan kelengkungan balok akan meningkat dengan cepat seiring dengan adanya peningkatan momen hingga balok mengalami keruntuhan. Berdasarkan mekanisme keruntuhan balok, adanya penambahan nilai rasio tulangan memberikan tahanan

yang lebih baik pada penampang balok sehingga mampu memperlambat laju keruntuhan pada balok. Tee dkk. [17] juga telah melakukan investigasi kapasitas balok apabila diberi perlakuan berupa variasi dari rasio penulangan balok. Adanya penambahan nilai rasio tulangan, maka nilai tegangan yang terjadi pada balok semakin berkurang. Oleh karena itu, adanya penambahan nilai rasio tulangan mampu memperlambat mekanisme keruntuhan spesimen balok.

Tabel 4. Beban dan defleksi balok kondisi ultimate

Kode	Beban (kN)	Defleksi Tengah Bentang (mm)	Persentase Beban (%)	Persentase Defleksi (%)
BG-1/2-20	107.98	55.83	+10.15	+95.86
BG-1/2-40	118.94	109.35		
BG-2/3-20	66.46	6.11	+17.65	+14.07
BG-2/3-40	78.19	6.97		
BR-1/2-20	79.88	101.09	+99.38	-86.42
BR-1/2-40	159.27	13.72		
BR-2/3-20	64.09	6.90	+56.33	+8.98
BR-2/3-40	100.19	7.52		

Berdasarkan sumber lain, Mohammed [18] mengatakan bahwa rasio tulangan tidak memiliki pengaruh yang berarti terhadap kapasitas lentur balok. Kapasitas lentur balok lebih dipengaruhi oleh konfigurasi jumlah tulangan baja yang digunakan. Semakin banyak penggunaan jumlah tulangan baja, maka kapasitas lentur balok akan meningkat diiringi dengan pengurangan nilai defleksi pada balok. Adanya penambahan jumlah tulangan baja, mengakibatkan interaksi tegangan lekat yang terjadi antara tulangan baja dan beton semakin bertambah. Apabila kuat lekat antara beton dan baja tulangan lebih kuat, maka baja tulangan mampu memberikan tahanan dalam mencegah timbulnya retak-retak balok sedini mungkin. Optimasi kuat lekat antara beton dan tulangan baja mampu ditingkatkan melalui penggunaan tulangan ulir, tegangan lekat tulangan ulir memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan penggunaan tulangan polos, hal tersebut disebabkan oleh keberadaan takikan pada tulangan ulir yang dalam hal ini berkontribusi dalam penambahan kekuatan lekatan pada beton dan baja tulangan.

Tabel 5. Persentase peningkatan beban dan defleksi balok beton gradasi yang dikomparasikan terhadap balok kontrol

Kode	Beban (kN)	Defleksi Tengah Bentang (mm)	Persentase Beban (%)	Persentase Defleksi (%)
BG-1/2-20	107.98	55.83	+26.02%	-81.07%
BR-1/2-20	79.88	101.09		
BG-1/2-40	118.94	109.35	-33.91%	+87.45%
BR-1/2-40	159.27	13.72		
BG-2/3-20	66.46	6.11	+3.57%	-12.92%
BR-2/3-20	64.09	6.90		
BG-2/3-40	78.19	6.97	-28.14%	+7.89%
BR-2/3-40	100.19	7.52		

Tabel 5 menunjukkan bahwa spesimen gradasi yang pembesiannya dirancang terhadap mutu beton 20 MPa jika dibandingkan dengan spesimen kontrolnya, capaian beban yang dihasilkan semakin meningkat dan defleksinya menurun. Sedangkan untuk spesimen gradasi yang pembesiannya dirancang terhadap mutu beton 40 MPa jika dibandingkan spesimen kontrolnya, capaian beban mengalami penurunan dan defleksinya meningkat. Hal tersebut wajar karena terdapat kontribusi beton mutu tinggi pada serat tekan spesimen BG-1/2-20 dan BG-2/3-20 yang memperkuat kinerja balok dalam menahan beban bila dibandingkan dengan spesimen kontrolnya yang disusun menggunakan mutu seragam 20 MPa. Lain hal dengan BG-1/2-40 dan BG-2/3-40, kedua spesimen tersebut terdapat mutu beton 20 MPa pada serat tarik balok yang dapat memperlemah kinerja struktur bila dibandingkan dengan spesimen kontrolnya yang dirancang menggunakan mutu beton 40 MPa. Berdasarkan **Tabel 5**, dapat disimpulkan bahwa spesimen balok dengan rasio dimensi 1/2 yang dirancang terhadap mutu beton 20 MPa berpotensi untuk diaplikasikan di lapangan. Aplikasi gradasi mutu pada balok dapat meningkatkan kapasitas beban hingga 26% dengan penurunan angka defleksi hingga 81% sehingga dapat menciptakan struktur dengan tingkat layan tinggi.

Kekakuan Balok

Nilai kekakuan balok dapat dianalisis berdasarkan hasil capaian beban dan defleksi pada tiap-tiap spesimen balok saat retak pertama. Cara memperoleh nilai kekakuan balok yaitu dengan membandingkan nilai capaian beban terhadap nilai defleksi yang dihasilkan. Hasil perhitungan kekakuan balok dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Reduksi kekuatan material beton pada serat tarik balok gradasi menyebabkan kekakuan balok semakin bertambah jika dikomparasikan terhadap spesimen kontrol yang didesain dengan menggunakan mutu beton rendah. Penggunaan beton mutu tinggi pada bagian serat tekan balok mampu menurunkan nilai defleksi yang dihasilkan. Rao [19] menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan balok terjadi apabila mutu beton yang diaplikasikan pada balok juga semakin ditingkatkan. Kekakuan erat kaitanya dengan hasil capaian defleksi yang dihasilkan. Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2019 [8], batas defleksi yang diijinkan pada suatu elemen struktur adalah sebesar $L/180$. Adanya batasan pada nilai defleksi dilakukan agar tingkat layan suatu elemen struktur dalam menerima beban kerja memiliki kekakuan yang cukup. Parameter suatu elemen struktur memiliki kemampulayanan yang baik apabila defleksi yang dihasilkan memiliki nilai dibawah batas defleksi yang diijinkan. Berdasarkan **Tabel 6**, dapat disimpulkan bahwa spesimen gradasi yang dirancang terhadap mutu beton 20 MPa mampu mereduksi defleksi yang terjadi diiringi dengan peningkatan kekakuan balok. Oleh karena itu, spesimen gradasi yang dirancang terhadap mutu beton 20 MPa memiliki kemampuan layan yang lebih baik.

Tabel 6. Persentase peningkatan kekakuan balok beton gradasi yang dikomparasikan terhadap balok kontrol

Kode	Beban (kN)	Defleksi Tengah Bentang (mm)	Kekakuan (kN/mm)	Persentase
BG-1/2-20	82.78	20.13	4.11	+443.47%
BR-1/2-20	72.45	95.75	0.76	
BG-1/2-40	52.34	4.78	10.95	-19.47%
BR-1/2-40	156.11	11.48	13.60	
BG-2/3-20	64.75	5.78	11.20	+16.74%
BR-2/3-20	62.18	6.48	9.60	
BG-2/3-40	76.43	4.83	15.83	-17.25%
BR-2/3-40	39.13	2.05	19.12	

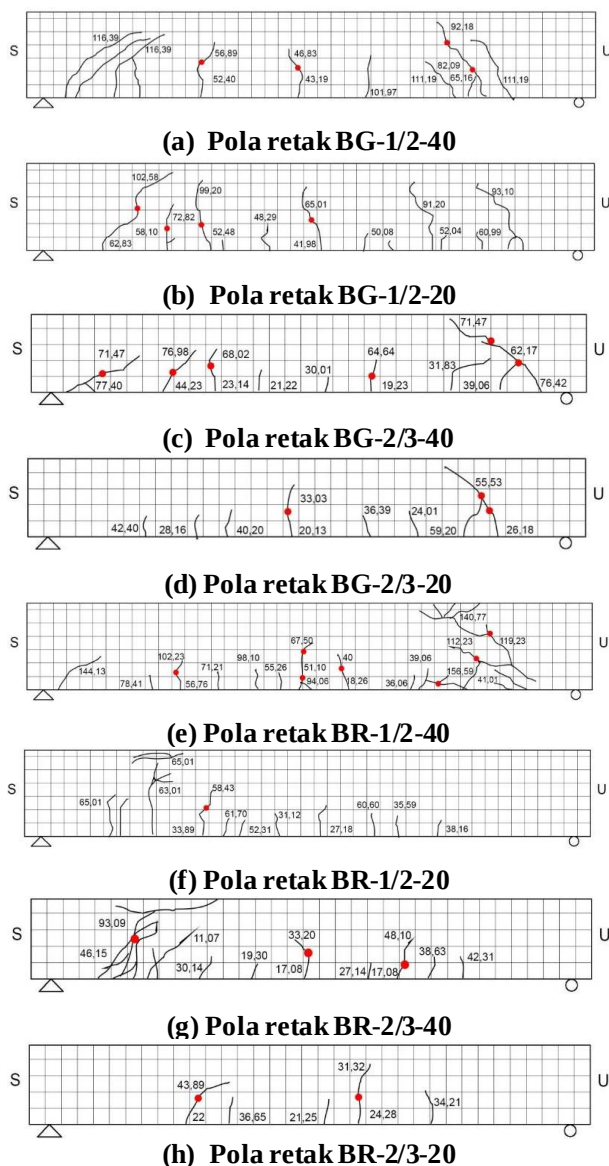
Pola Retak Balok

Balok secara keseluruhan mengalami pola kegagalan yang diawali dengan adanya retak lentur (**Gambar 5**). Retak lentur memiliki karakteristik berupa retak vertikal di area tengah bentang pada bagian serat tarik balok. Seiring dengan meningkatnya beban yang diterima oleh balok, maka retak vertikal yang terjadi di area tengah bentang balok semakin menyebar. Retak vertikal yang menyebar tadi memicu adanya retak diagonal yang terjadi di luar area tinjauan. Terjadinya retak diagonal ini menandakan bahwa balok mengalami retak geser setelah retak lentur terjadi. Pola kegagalan yang terjadi pada seluruh spesimen balok sesuai dengan perencanaan awal. Balok dirancang dengan rasio a terhadap d yaitu $2.5 < a/d < 6$, di mana a adalah jarak dari titik tumpuan ke titik beban terpusat dan d adalah tinggi efektif balok.

Andermatt dkk [20] mengklasifikasikan mekanisme kegagalan balok menjadi empat jenis, yaitu: 1) *Diagonal concrete tension failure*-DT; 2) *Flexural compression failure*-FC; 3) *Shear compression failure*-SC dan 4) *Compression strut failure*-S. *Diagonal concrete tension failure* ditandai dengan terbentuknya retak diagonal dari tepi bagian dalam tumpuan menuju titik pembebanan. *Flexural compression failure* ditandai dengan adanya *crushing* beton pada serat tekan balok di antara dua titik pembebanan (tinjauan lentur). *Shear compression failure* ditandai dengan terbentuknya retak diagonal seperti pada *diagonal concrete tension failure*, namun diikuti dengan adanya *crushing* beton pada ujung retak diagonal di sisi tekan balok tinjauan lentur. Kegagalan ini bersifat tiba-tiba. *Compression strut failure* ditandai dengan terbentuknya retak diagonal mengitari daerah strut. Kegagalan ini bersifat getas.

Riset yang menyelidiki *size effect* balok terhadap mekanisme kegagalan geser telah dilakukan oleh Slowik dkk [21]. Percobaan dilakukan dengan menggunakan spesimen dengan rasio bentang geser dan tinggi efektif (a/d) yang bervariasi. Hasil menyebutkan bahwa rasio bentang geser dan tinggi efektif (a/d) merupakan parameter primer yang berpengaruh terhadap kuat geser beton bertulang. Nilai dari tinggi efektif bergantung dari ketinggian balok (h). Adanya peningkatan tinggi (h) balok, memperkecil kapasitas geser *ultimate* balok sehingga balok lebih rentan untuk mengalami terjadinya kegagalan geser. Selain tinggi balok, pengaruh dari panjang balok juga mempengaruhi mekanisme kegagalan balok. Balok yang memiliki ukuran lebih panjang akan lebih rentan mengalami kegagalan geser. Berbeda dengan tinggi maupun panjang balok, maka lebar balok menurut penelitian milik Kim dkk [22] menyatakan bahwa lebar balok tidak memiliki andil dalam proses terjadinya kegagalan geser.

Berdasarkan pola retak yang dihasilkan dari pengujian, hampir keseluruhan spesimen mengalami kombinasi retak lentur dan geser yaitu spesimen BG-1/2-20, BG-1/2-40, BG-2/3-20, BG-2/3-40, BR-1/2-20, BR-1/2-40 dan BR-2/3-40. Kegagalan ini terjadi ketika tahanan geser akibat pengaruh *aggregate interlock* (V_a) mengalami penurunan, sedangkan nilai tahanan geser akibat perilaku *dowel* dari tulangan lentur (V_d) dan nilai tahanan gaya geser pada daerah tekan yang dipikul oleh beton (V_c) mengalami peningkatan diiringi dengan percepatan sehingga balok yang tadinya mengalami gagal lentur akan mencapai kegagalan geser. Jika diklasifikasikan menurut penelitian milik Andermatt dkk [20], kegagalan pada spesimen ini tergolong jenis kegagalan *diagonal concrete tension failure*. BR-2/3-20 diklasifikasikan dalam jenis *flexural compression failure*.



Gambar 5. Pola retak spesimen balok

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat bahwa pada kondisi retak pertama, adanya reduksi kekuatan dari material beton balok beton gradasi di serat tarik mengakibatkan kekuatan material beton dalam menahan retak akan semakin berkurang. Pada kondisi leleh, peningkatan mutu beton yang digunakan pada serat tekan akan meningkatkan kapasitas beban yang mampu ditahan balok sehingga tingkat kelelahan balok juga semakin meningkat. Pada kondisi ultimate, apabila pembesian spesimen gradasi dirancang terhadap mutu beton terendah, persentase capaian beban yang dihasilkan semakin meningkat diiringi dengan penurunan persentase defleksi. Sedangkan untuk spesimen gradasi yang pembesannya dirancang

terhadap mutu beton tertingginya, persentase capaian beban yang dihasilkan mengalami penurunan dan persentase defleksinya meningkat.

Balok beton gradasi dapat meningkatkan tingkat layan balok karena adanya beton muru tinggi pada serat tekan yang dapat meningkatkan kekakuan elemen struktur. Pola retak yang terjadi pada balok beton gradasi dengan penggunaan tulangan maksimum maupun balok beton bertulang konvensional (kontrol) yaitu secara keseluruhan mengalami retak geser, yang membentuk retak diagonal (miring) terbuka.

Saran

Dapat direkomendasikan saran terhadap penelitian selanjutnya, yakni penelitian ini dapat dikembangkan dengan desain balok beton gradasi menggunakan tulangan minimum, sehingga hasil yang diperoleh dapat dikomparasikan dengan hasil penelitian saat ini. Penelitian selanjutnya dapat memvariasikan mutu beton serat tarik dan mutu beton serat tekan guna menginvestigasi lebih lanjut perilaku lentur yang dihasilkan. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan menambahkan perangkat berupa alat berupa crackmeter dalam menginvestigasi pola retak yang terjadi sehingga akurasi terkait pola retak lebih valid

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. A. Pratama, R. K. Suhud, P. Puspitasari, F. I. Kusuma, and A. B. N. R. Putra, "Finite element analysis of the bending moment-curvature of the double-layered graded concrete beam," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 494, no. 1, p. 012064, Mar. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/494/1/012064.
- [2] H. Aylie, B. S. Gan, S. As'ad, and M. M. A. Pratama, "Parametric study of the load carrying capacity of functionally graded concrete of flexural members," *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 5, no. 4, 2015.
- [3] M. M. A. Pratama, T. Vertian, B. S. Umniati, and W. H. Yoh, "Flexural behaviour of the functionally graded concrete beams using two-layers and three-layers configuration," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 669, p. 012054, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/669/1/012054.
- [4] M. M. A. Pratama, W. Arifanda, K. Karyadi, N. Nindyawati, R. Sulaksitaningrum, and H. Prayuda, "Numerical and experimental investigation on the shear resistance of functionally graded concrete (FGC) beams,"

- IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 669, p. 012055, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/669/1/012055.
- [5] B. S. Gan, H. Aylie, and M. M. A. Pratama, "The Behavior of Graded Concrete, an Experimental Study," *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 885–891, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.076.
- [6] M. M. A. Pratama, B. S. Umniati, B. Arumsari Mutiara Wulandari, A. L. Han, B. Sthenly Gan, and Z. Zhabrinna, "Modulus elasticity of the graded concrete, a preliminary research," *MATEC Web Conf.*, vol. 195, p. 01005, Aug. 2018, doi: 10.1051/mateconf/201819501005.
- [7] M. M. A. Pratama *et al.*, "Effect of concrete strength configuration on the structural behaviour of reinforced graded concrete beams," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1808, no. 1, p. 012017, Mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1808/1/012017.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 2847-2019," *Persyaratan Bet. Strukt. untuk bangunan gedung dan penjelasan*, 2019.
- [9] "ACI CODE-318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary." <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U19&Language=English> (accessed Jul. 08, 2021).
- [10] M. M. A. Pratama, "ANALISIS DAKTILITAS BALOK BETON GRADASI DENGAN DISPARITAS MUTU BETON SERAT TEKAN DAN SERAT TARIK | Pratama | BANGUNAN," *Bangunan*, 2021. <http://journal2.um.ac.id/index.php/bangunan/article/view/22402> (accessed Jul. 08, 2021).
- [11] H. Prayuda *et al.*, "Seismic performance of low-rise building using graded concrete as flexural elements," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1144, no. 1, p. 012014, May 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1144/1/012014.
- [12] M. M. A. Pratama, S. Abifurrizal, Y. Novitasari, W. Damayanthi, P. Puspitasari, and A. A. Permanasari, "Potential use of graded concrete as structural elements of multi-storey buildings," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1833, no. 1, p. 012040, Mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1833/1/012040.
- [13] A. E. Ajeel, T. A. Qaseem, and S. R. Rasheed, "Structural Behavior of Voided Reinforced Concrete Beams Under Combined Moments," *Civ. Environ. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 17–24, 2018, Accessed: Jul. 08, 2021. [Online]. Available: <https://iiste.org/Journals/index.php/CER/article/view/40577>.
- [14] M. Słowik, "The analysis of failure in concrete and reinforced concrete beams with different reinforcement ratio," *Arch. Appl. Mech.*, vol. 89, no. 5, pp. 885–895, May 2019, doi: 10.1007/s00419-018-1476-5.
- [15] D. Gao, Z. Gu, and C. Wu, "Bending Behavior and Deflection Prediction of High-Strength SFRC Beams under Fatigue Loading," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 6143–6159, May 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.04.017.
- [16] S. A. Ashour, "Effect of compressive strength and tensile reinforcement ratio on flexural behavior of high-strength concrete beams," *Eng. Struct.*, vol. 22, no. 5, pp. 413–423, May 2000, doi: 10.1016/S0141-0296(98)00135-7.
- [17] H. Hean Tee, K. Al-Sanjery, and J. C. Luin Chiang, "Behaviour of Over-reinforced Concrete Beams with Double Helix and Double Square Confinements Related to Ultimate Bending and Shear Strength," *J. Phys. Sci.*, vol. 29, no. Supp. 2, pp. 77–98, Jul. 2018, doi: 10.21315/jps2018.29.s2.7.
- [18] A. A. Mohammed, D. K. Assi, and A. S. Abdulrahman, "Behavior of concrete beams reinforced with low ratio of flexural steel reinforcement," *J. Struct. Eng.*, vol. 45, no. 3, 2018.
- [19] G. A. Rao, I. Vijayanand, and R. Eligehausen, "Studies on ductility of RC beams in flexure and size effect," 2007.
- [20] M. F. Andermatt and A. S. Lubell, "Behavior of Concrete Deep Beams Reinforced with Internal Fiber-Reinforced Polymer—Experimental Study," *ACI Struct. J.*, vol. 110, no. 4, 2013, doi: 10.14359/51685744.
- [21] M. Słowik, "Shear Failure Mechanism in Concrete Beams," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 3, pp. 1977–1982, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.06.318.
- [22] S.-W. Kim, C.-Y. Jeong, J.-S. Lee, and K.-H. Kim, "Size Effect in Shear Failure of Reinforced Concrete Beams with Recycled Aggregate," *J. Asian Archit. Build. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 323–330, Sep. 2013, doi: 10.3130/jaabe.12.323.