

Pengaruh Penggunaan Baja Ringan Hollow Berisi Mortar Sebagai Pengganti Baja Tulangan Terhadap Kuat Lentur Balok

Rakha Citra Permana Adinata¹, Elvis Saputra¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 55584

rakhapermana32@gmail.com, elvis.saputra@uii.ac.id

Abstract

The significant development in Indonesia has led to an increase in the demand for construction materials. One crucial material in building structures is reinforced concrete. Reinforced concrete is a composite material of concrete and steel reinforcement. Steel reinforcement plays a vital role in resisting tensile forces. However, reinforced concrete has a primary weakness, namely, its low tensile strength, which affects the weight of concrete and the overall strength of the building structure. To address this issue, several studies have been conducted to develop lightweight reinforced concrete without compromising its functionality and strength. One innovation introduced is the use of lightweight steel as a replacement for conventional steel reinforcement due to its lower weight. This research aims to investigate the effect of using lightweight steel filled with mortar as a substitute for conventional steel reinforcement on flexural strength. The testing method involves two-point loading and measuring deflection using LVDT on the test specimens. The results of the study show that the comparison between experimental and theoretical nominal moments indicates a minor difference. The experimental nominal moment of lightweight steel reinforced beams increases by 1.84 kNm or 18.91% compared to conventional steel reinforced beams. However, the maximum deflection in lightweight steel reinforced beams is smaller by 23% or 5.9 mm. These results suggest that using lightweight steel can increase the nominal moment while producing smaller deflections.

Keywords: Reinforced concrete, Lightweight steel, Flexural strength, Deflection

Abstrak

Pembangunan yang meningkat secara signifikan di Indonesia mengakibatkan peningkatan kebutuhan bahan material. Salah satu bahan material yang penting dalam struktur bangunan adalah beton bertulang. Beton bertulang merupakan material komposit antara beton dan tulangan baja. Tulangan baja memiliki peran penting dalam menahan gaya tarik. Namun, beton bertulang memiliki kelemahan utama yaitu kekuatan persatuan beton yang rendah, yang berdampak pada berat beton dan kekuatan struktur bangunan. Untuk mengatasi hal ini, dilakukan beberapa penelitian pengembangan beton bertulang yang lebih ringan tanpa mengurangi fungsi dan kekuatannya. Salah satu inovasi yang dilakukan adalah menggunakan baja ringan sebagai pengganti baja tulangan karena memiliki berat yang lebih rendah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan baja ringan berisi mortar sebagai pengganti baja tulangan terhadap kekuatan lentur. Metode pengujian menggunakan beban dua titik dan pengukuran lendutan menggunakan LVDT pada benda sampel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbandingan antara momen nominal eksperimen dan teoritis menunjukkan perbedaan yang kecil. Momen nominal eksperimen balok bertulang baja ringan meningkat sebesar 1,84 kNm atau 18,91% dibandingkan dengan balok bertulang baja. Namun lendutan maksimum pada balok bertulang baja ringan lebih kecil sebesar 23% atau 5,9 mm. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa balok menggunakan baja ringan dapat meningkatkan momen nominal, namun menghasilkan lendutan yang lebih kecil.

Kata Kunci: Beton bertulang, Baja ringan, Kuat lentur, Lendutan

PENDAHULUAN

Pembangunan yang terjadi di Indonesia mengalami perkembangan pesat akibat pemerataan infrastruktur yang sedang dilakukan pemerintah. Hal ini berdampak pada kebutuhan material dalam pembangunan yang meningkat, salah satu kebutuhan material adalah beton bertulang.

Beton mempunyai kelebihan diantaranya, mempunyai kuat tekan yang tinggi, tahan terhadap pengkaratan atau pembusukan oleh kondisi lingkungan. Tetapi beton juga mempunyai kelemahan, yaitu lemah terhadap kuat tarik beton (Dewi, dan Suandi, 2021). Oleh sebab itu, beton bertulang digunakan sebagai pencegahan terhadap beton yang tidak dapat menahan beban lentur secara signifikan. Menurut Hastono, (2013), gaya yang bekerja pada struktur, seperti beban mati, beban hidup, serta beban tambahan seperti beban angin, susut dan perubahan suhu dapat menyebabkan lentur dan deformasi pada elemen struktur. Peningkatan beban secara berkala dapat menyebabkan keruntuhan pada elemen struktur. Baja

tulangan yang digunakan pada tulangan memiliki kandungan karbon (C) yang lebih tinggi dibandingkan dengan baja ringan (Khodir, 2017). Dalam perhitungan teoritis, kuat lentur pada balok beton bertulang yang menggunakan baja ringan memiliki kuat lentur yang lebih tinggi sebesar 20,3% dibanding dengan beton dengan tulangan baja berdiameter 12 mm (Hastono, 2013).

Penelitian yang dilakukan oleh Dewi, dan Suandi, (2021) menyatakan bahwa nilai kuat lentur rata-rata pada balok berbaja ringan dapat meningkatkan kuat lentur dibandingkan dengan balok tulangan baja, yaitu 11,816 Mpa untuk balok baja ringan dan 9,993 Mpa untuk balok baja tulangan. Penggunaan karbon yang berlebihan pada komposisi baja akan mengakibatkan efek rumah kaca yang dapat menyebabkan pemanasan global. Sehingga, diperlukan inovasi untuk meningkatkan kuat lentur beton dengan bahan yang ramah lingkungan. Salah satu upaya yang dilakukan adalah mengganti baja tulangan pada tulangan longitudinal dengan baja ringan. Baja ringan memiliki kandungan karbon sebesar 0,30% (Royani, 2020),

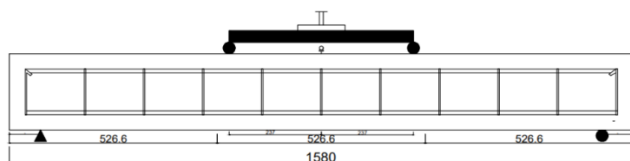
relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan baja tulangan sebesar 2,1% (Irwan dkk, 2021).

Penelitian ini menggunakan baja ringan sebagai tulangan pada balok yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh peningkatan momen lentur, sehingga dapat menghasilkan balok bertulang yang lebih kuat menahan beban lentur. Pengujian dilakukan setelah umur 28 hari dengan menggunakan metode pembebanan dua titik. Selain itu, pada saat pengujian juga diamati keruntuhan pada balok beserta dengan pola retak yang terjadi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen, dalam penelitian ini terdapat dua variabel yaitu, variabel terikat dan variabel bebas. Variabel terikat pada penelitian ini adalah balok beton bertulang baja dan variabel bebas dalam penelitian ini adalah balok beton bertulang baja ringan. Menurut SNI 2847-2019, beton didefinisikan sebagai gabungan semen hidrolis, dengan agregat halus dan kasar, serta air. Pengujian melibatkan sampel balok beton bertulang dan beton silinder. Pada perancangan struktur beton bertulang, sangat penting memahami sifat baja yaitu, modulus elastisitas (E_s) dan tegangan leleh (f_y) (Setiawan, 2008).

Sebelum pembuatan benda uji sampel balok dan silinder, bahan-bahan penyusun balok beton bertulang dilakukan pengujian material baik agregat kasar maupun agregat halus seperti, berat jenis, kadar air, kadar lumpur dan uji *propertesi* lainnya, serta baja tulangan dan baja ringan diuji tarik untuk mengetahui nilai kuat tarik masing - masing bahan tersebut. Setelah bahan penyusun diuji dan telah memenuhi standar sebagai bahan penyusun campuran beton, maka langkah pertama yang dilakukan membuat 3 buah sampel beton silinder dengan dimensi diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Beton dilakukan uji kuat tekan setelah mengalami rendaman selama 28 hari dengan nilai kuat tekan yang direncanakan adalah 20 MPa. Setelah itu, Sampel balok beton bertulang berdimensi 150 x 200 x 1580 mm seperti dapat dilihat **Gambar 1**, dilakukan uji lentur menggunakan pembebanan dua titik yang perletakkannya dengan jarak 1/3 dari masing-masing tumpuan.

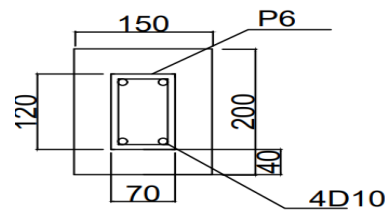


Gambar 1. Sketsa Pengujian Kuat Lentur

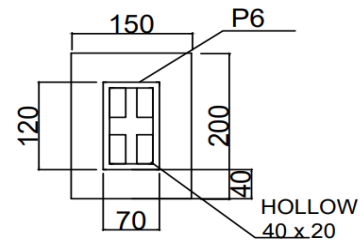
Sampel berjumlah 6 dengan 3 balok baja tulangan dengan kodefikasi BJ 01 dan 3 balok baja ringan dengan kodefikasi BJ 02, dapat dilihat pada **Tabel 1**. Perawatan selama 28 hari menggunakan karung goni basah. Baja tulangan yang digunakan adalah D10 dan sengkangnya P6, detail penulangan dapat dilihat pada **Gambar 2**, sedangkan untuk penulangan baja ringan menggunakan dua ukuran, pada daerah tekan menggunakan ukuran 30 x 20 mm, dan pada daerah tarik menggunakan 40 x 20 mm, detail penulangan dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Tabel 1. Rincian Sampel Pengujian Beton

Pengujian	Tulangan	Kode	Bentuk (mm)	Jumlah sampel
Kuat Tekan	-	BN	Silinder (150 x 300)	3
	Baja	Bj 01	Balok (150 x 200 x 1580)	3
Kuat Lentur	Hollow	Bj 02	Balok (150 x 200 x 1580)	3

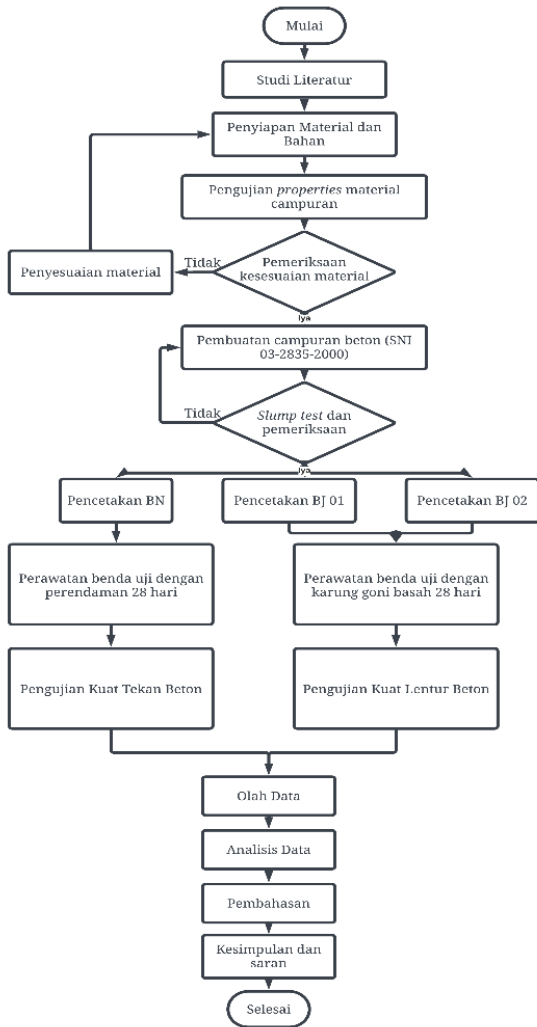


Gambar 2. Detail Penulangan Balok BJ 01



Gambar 3. Detail Penulangan Balok BJ 02

Setelah itu dilakukan pengujian kuat lentur menggunakan *loading frame* dengan pembebanan dua titik pada jarak 1/3 dari tumpuan, pada bagian tengah bentang dipasang *Linear Variabel Differential Transformers* (LVDT) untuk mengukur lendutan yang terjadi pada sampel balok. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mekanika dan Rekayasa Struktur, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Berikut merupakan bagan alir penelitian yang dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Bagan Alir Penelitian

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Kuat Tekan

Kuat tekan beton merupakan berat beban maksimum persatuan luas pada saat benda uji hancur (SNI 03-1974-2011). Silinder beton dilakukan uji kuat tekan menggunakan *compression testing machine* di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Dari uji tekan didapatkan nilai rata-rata kuat tekan 21,5 MPa. Dengan demikian beton telah sesuai mutu rencana dan layak digunakan untuk bahan beton bertulang.

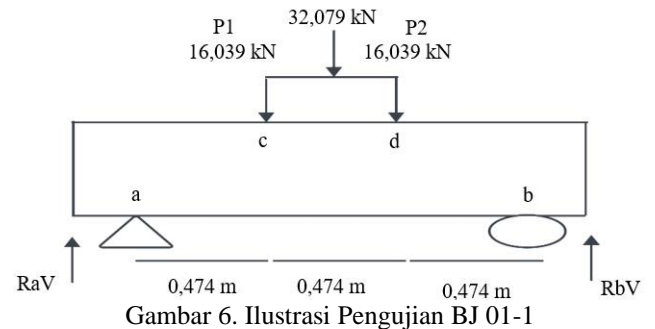
Analisis Momen Lentur Baja Ringan (*Hollow*) dan Baja Tulangan

Balok beton yang telah melalui perawatan menggunakan karung goni basah selama 28 hari, selanjutnya dilakukan pengujian lentur balok dengan metode pembebanan dua titik yang dapat dilihat **Gambar 5**. Pengujian kuat lentur beton dilakukan untuk mengetahui nilai beban maksimum yang dihasilkan dan juga untuk mengetahui keretakan yang terjadi berdasarkan jenis keruntuhan pada balok (Khala, dkk, 2021).



Gambar 5. Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang

Momen nominal eksperimen baja tulangan



Gambar 6. Ilustrasi Pengujian BJ 01-1

$$P = 32,079$$

$$P1 = 16,039 \text{ kN}$$

$$P2 = 16,039 \text{ kN}$$

Reaksi yang terjadi pada tumpuan

$$\sum M = P \times L$$

$$\sum Ma = P1 \times 0,474 + P2 \times 0,948 - Rbv \times 1,422$$

$$= 16,039 \times 0,474 + 16,039 \times 0,948 - 16,039 \times 1,422$$

$$Rbv \times 1,422 = 7,603 + 15,206$$

$$Rbv = 22,809/1,422$$

$$Rbv = 16,039 \text{ kN}$$

$$\sum Mb = -P2 \times 0,474 - P2 \times 0,948 + Rav \times 1,422$$

$$= -16,039 \times 0,474 - 16,039 \times 0,948 + 16,039 \times 1,422$$

$$Rav \times 1,422 = 7,603 + 15,206$$

$$Rav = 22,809/1,422$$

$$Rav = 16,039 \text{ kN}$$

Momen yang terjadi pada balok, ditinjau dari kiri

$$\sum Mc = Rav \times 0,474$$

$$= 16,039 \times 0,474$$

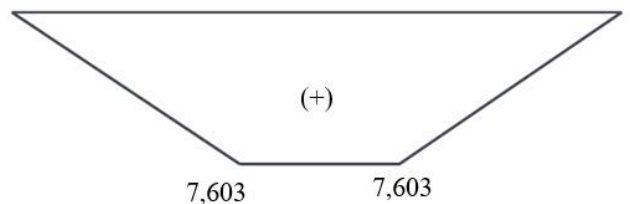
$$= 7,603 \text{ kNm}$$

$$\sum Md = Rav \times 0,984 - P1 \times 0,474$$

$$= 16,039 \times 0,984 - 16,039 \times 0,474$$

$$= 15,206 - 7,603$$

$$= 7,603 \text{ kNm}$$



Gambar 7. Bending Moment Diagram (BMD) BJ 01-1

Perhitungan sampel lain pada baja tulangan (BJ 01) dan baja ringan (BJ 02) dianalisis dengan cara yang serupa. Hasil Rekapitulasi perhitungan nilai kekakuan balok dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 2. Hasil Rekapitulasi Momen Nominal Eksperimen

Kode	Beban (kN)	Panjang (m)	Momen Nominal eksperimen (kNm)
BJ 01 -1	32,079	1422	7,603
BJ 01 -2	32,894	1422	7,796
BJ 01 -3	35	1422	8,259
Rata-rata			7,886
BJ 02 -1	36,516	1422	8,654
BJ 02 -2	43,196	1422	10,238
BJ 02 -3	43,4	1422	10,286
Rata-rata			9,726

Dari **Tabel 2**, diketahui bahwa rata-rata momen nominal eksperimen dari balok BJ 01 sebesar 7,886 kNm, sedangkan balok BJ 02 sebesar 9,726 kNm. Sehingga dapat diketahui bahwa balok menggunakan tulangan baja ringan dapat meningkatkan momen nominal eksperimen sebesar 1,84 kNm atau 18,92% dari balok baja tulangan.

Analisis Momen Lentur Teoritis Baja Ringan (*Hollow*) dan Baja Tulangan

Balok Baja Tulangan

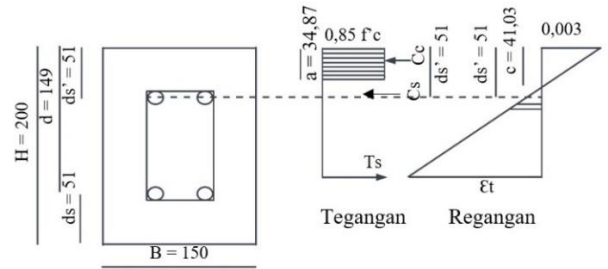
Diketahui,
Lebar balok (B) = 150 mm
Tinggi Balok (H) = 200 mm
Selimut Beton (Sb) = 40 mm
Mutu Beton ($f'c$) = 21,5 MPa
Mutu Baja (F_y) = 444,6 Mpa
Modulus elastisitas (E) = 200000 MPa
D pokok = 10 mm
D Sengkang = 6 mm

$$\begin{aligned} \text{Tinggi titik berat tarik (ds)} &= Sb + D \text{ Tul} \\ \text{sengkang} + (0,5 \times D \text{ pokok tarik}) & \\ &= 40 + 6 + (0,5 \times 10) \\ &= 51 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi titik berat tekan (ds')} &= Sb + D \text{ Tul} \\ \text{sengkang} + (0,5 \times D \text{ pokok tarik}) & \\ &= 40 + 6 + (0,5 \times 10) \\ &= 51 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi efektif balok (d)} &= H - ds \\ &= 200 - 51 \\ &= 149 \text{ mm} \end{aligned}$$

Balok bertulang dianalisis menggunakan konsep momen nominal tulangan rangkap, sehingga menghasilkan grafik tegangan-regangan beton tulangan rangkap yang dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Grafik Tegangan-Regangan beton Tulangan Rangkap Balok Baja Tulangan

Dilihat dari **Gambar 8** hubungan tegangan regangan nilai c yang terlalu dalam mengakibatkan nilai ϵ_s menjadi tarik sehingga tulangan pada daerah tekan tidak signifikan pengaruhnya. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Puryanto, (2013), Bila tulangan tekan dipasang terlalu dalam dapat mengakibatkan A_s' tidak meleleh. Terlebih ekstrim nila letak A_s' lebih dalam dari garis netralnya c , sehingga f_s' menjadi tarik, maka A_s' diabaikan. Sehingga analisis untuk momen nominal teoritis menggunakan konsep tulangan tunggal. Mencari a dan C_c (tulangan tunggal)

$$\begin{aligned} T_s &= A_s \times F_y \\ C_c &= 0,85 \times f'c \times a \times B \\ T_s &= C_c \\ A_s \times F_y &= 0,85 \times f'c \times a \times B \\ a &= \frac{A_s \times F_y}{0,85 \times f'c \times B} \\ a &= \frac{157,079 \times 444,6}{0,85 \times 21,5 \times 150} \\ a &= 25,476 \text{ mm} \\ C_c &= 0,85 \times 21,5 \times 25,476 \times 150 \\ C_c &= 69837,604 \text{ N} \\ M_n &= \phi \times (C_c \times (d - a/2)) \\ M_n &= 0,9 \times (69837,604 \times (149 - 25,476/2)) \\ M_n &= 8564575,099 \text{ Nmm} = 8,564 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Balok Baja Ringan

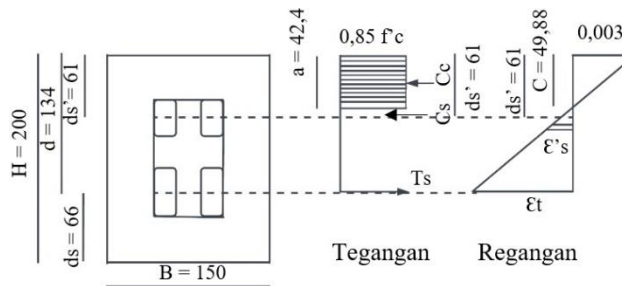
Diketahui,
Lebar balok (B) = 150 mm
Tinggi Balok (H) = 200 mm
Selimut Beton (Sb) = 40 mm
Mutu Beton ($f'c$) = 21,5 MPa
Mutu Baja (F_y) = 375,2 Mpa
Modulus elastisitas (E) = 200000 MPa
D pokok tekan = 30x20 mm
D pokok tarik = 40x20 mm
D Sengkang = 6 mm

$$\begin{aligned} \text{Tinggi titik berat tarik (ds)} &= Sb + D \text{ Tul} \\ \text{sengkang} + (0,5 \times D \text{ pokok tarik}) & \\ &= 40 + 6 + (0,5 \times 40) \\ &= 66 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi titik berat tekan (ds')} &= Sb + D \text{ Tul} \\ \text{sengkang} + (0,5 \times D \text{ pokok tarik}) & \\ &= 40 + 6 + (0,5 \times 30) \\ &= 65 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi efektif balok (d)} &= H - ds \\ &= 200 - 66 \\ &= 134 \text{ mm} \end{aligned}$$

Balok bertulang dianalisis menggunakan konsep momen nominal tulangan rangkap, sehingga menghasilkan grafik tegangan-regangan beton tulangan rangkap yang dapat dilihat pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Grafik Tegangan-Regangan beton Tulangan Rangkap Balok Tulangan Baja Ringan

Dilihat dari **Gambar 9** hubungan tegangan regangan nilai c yang terlalu dalam mengakibatkan nilai ϵ_s menjadi tarik sehingga tulangan pada daerah tekan tidak signifikan pengaruhnya. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Puryanto, (2013), Bila tulangan tekan dipasang terlalu dalam dapat mengakibatkan As' tidak meleleh. Terlebih ekstrim nila letak As' lebih dalam dari garis netralnya c , sehingga f_s' menjadi tarik, maka As' diabaikan. Sehingga analisis untuk momen nominal teoritis menggunakan konsep tulangan tunggal.

Mencari a dan C_c (tulangan tunggal)

$$\begin{aligned} T_s &= A_s \times F_y \\ C_c &= 0,85 \times f'_c \times a \times B \\ T_s &= C_c \\ A_s \times F_y &= 0,85 \times f'_c \times a \times B \\ a &= \frac{A_s \times F_y}{0,85 \times f'_c \times B} \\ a &= \frac{232 \times 375,2}{0,85 \times 21,5 \times 150} \\ a &= 31,754 \text{ mm} \\ C_c &= 0,85 \times 21,5 \times 31,754 \times 150 \\ C_c &= 87045,67 \text{ N} \\ M_n &= \phi \times (C_c \times (d-a/2)) \\ M_n &= 0,9 \times (87045,67 \times (149 - 31,754/2)) \\ M_n &= 9645579 \text{ Nmm} = 9,64 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Tabel 3. Perbandingan Momen Lentur Eksperimen dan teoritis

Kode	teoritis	
	Momen Nominal eksperimen (kNm)	Momen Nominal teoritis (kNm)
BJ 01	7,886	8,564
BJ 02	9,726	9,64

Dilihat pada **Tabel 3** perbedaan momen lentur balok bertulang baja (BJ 01) mempunyai momen lentur teoritis yang lebih tinggi sebesar 0,678 kNm atau 7,923%, hal ini bisa terjadi karena perbedaan asumsi diameter baja yang digunakan. Sedangkan perbedaan momen lentur balok bertulang baja ringan (BJ 02) mempunyai momen lentur teoritis yang lebih rendah sebesar 0,08 kNm atau 0,82%, hal ini bisa terjadi karena pada kondisi aktual baja ringan diisi

mortar sehingga baja ringan dapat menerima beban lebih besar. Tabel 5.13 juga menunjukkan bahwa momen lentur balok bertulang baja ringan baik eksperimen maupun teoritis mengalami peningkatan terhadap balok bertulang baja. Hal ini dapat dikarenakan beberapa faktor misalnya, perbedaan luas tulangan yang signifikan antara baja tulangan dan baja ringan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa balok dengan tulangan baja ringan dapat meningkatkan momen lentur.

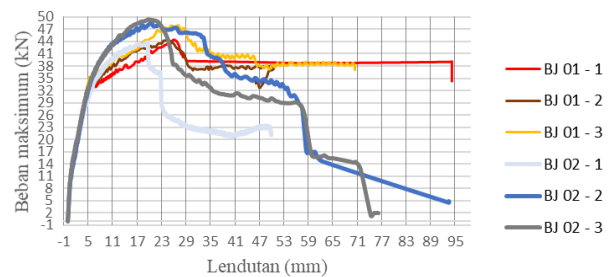
Analisis Lenturan Balok Bertulang dan Baja Ringan (Hollow)

Data yang diperoleh dari hasil pengujian yang menggunakan LVDT menghasilkan nilai lendutan yang terjadi. Hal ini digunakan untuk mengetahui pengaruh dari penggunaan baja ringan pada balok. Berikut merupakan rekapitulasi grafik dari baja tulangan (BJ 01) dan baja ringan (BJ 02) yang dapat dilihat pada **Gambar 10** dan **Tabel 4**.

Tabel 4. Rekapitulasi Lenturan Pada Retak Pertama dan Beban *Ultimate*

Kode	Lenturan Pada Retak Pertama	Lenturan Pada Beban <i>Ultimate</i>
	(mm)	(mm)
BJ 01 -1	0,808	26,22
BJ 01 -2	0,497	24,075
BJ 01 -3	0,808	27,084
Rata-rata	0,704	25,793
BJ 02 -1	0,516	19,4
BJ 02 -2	0,73	18,485
BJ 02 -3	0,487	19,79
Rata-rata	0,406	19,225

Tabel 4 Menunjukkan bahwa lendutan pada saat retak pertama dan maksimum terjadi perilaku yang serupa antara tulangan baja ringan dan baja tulangan, dimana baja ringan memiliki rata rata lendutan sebesar 0,406 mm saat retak pertama, dan baja tulangan sebesar 0,704 mm. Pada saat retak pertama nilai lendutan baja ringan lebih rendah sebesar 0,298 mm atau sebesar 42,33 %. Sedangkan pada beban *ultimate* baja ringan memiliki rata rata lendutan sebesar 19,225 mm, dan baja tulangan sebesar 25,793 mm. Pada saat beban *ultimate* nilai lendutan baja ringan lebih rendah sebesar 6,568 mm atau sebesar 25,46 %. Hal ini menunjukkan bahwa tulangan menggunakan baja ringan berisi mortar dapat menurunkan kapasitas lendutan dibandingkan dengan baja tulangan.



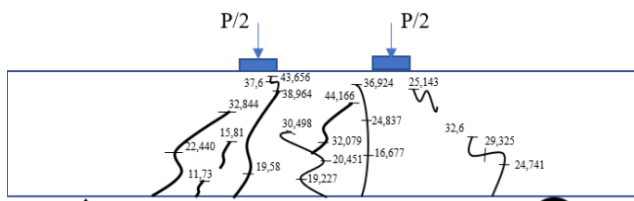
Gambar 10. Grafik Perbandingan Beban Lenturan BJ 01 dan BJ 02

Analisis Pola Retak dan Keruntuhan Balok Bertulang Baja dan Baja Ringan (*Hollow*)

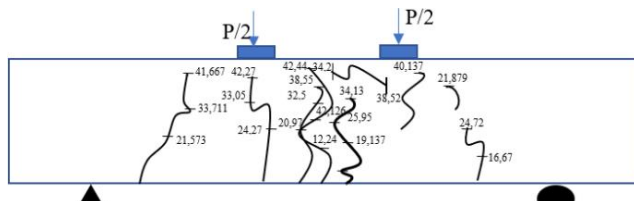
Retakan pada balok beton bertulangan dibedakan menjadi 5, yaitu retak lentur, retak geser, retak geser lentur, retak puntir, dan retak lekatan (Jack, dkk, 2005). Pola retak yang terlihat pada balok dapat memberikan informasi terkait jenis keruntuhan yang terjadi. Menurut Edward dan Nawi, (2009), Terdapat 3 jenis keruntuhan, yaitu keruntuhan lentur, keruntuhan tekan dan keruntuhan seimbang.

Balok Baja Tulangan

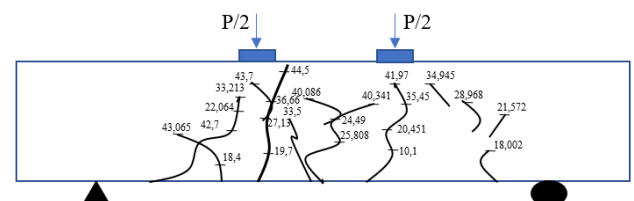
Balok beton tulangan baja masing-masing mengalami runtuh setelah menerima beban sebesar 44,47 kN pada BJ 01-1 dengan lendutan sebesar 26,1 mm, 44,26 kN pada BJ 01-2 dengan lendutan sebesar 24,075 mm, 47,91 kN pada BJ 01-3 dengan lendutan sebesar 27,084 mm. Ketiga sampel BJ 01 mengalami kegagalan pada daerah lapangan yang diawali retakan pada bagian bawah hingga melebar ke atas sebelum akhirnya runtuh. Berikut merupakan pola retak yang terjadi pada BJ 01 yang dapat dilihat pada Gambar 11 s.d. Gambar 13



Gambar 11. Pola Keruntuhan BJ 01-1



Gambar 12. Pola Keruntuhan BJ 01-2

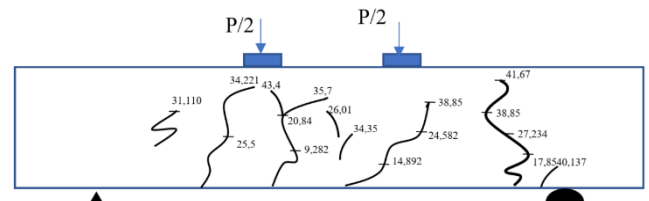


Gambar 13. Pola Keruntuhan BJ 01-3

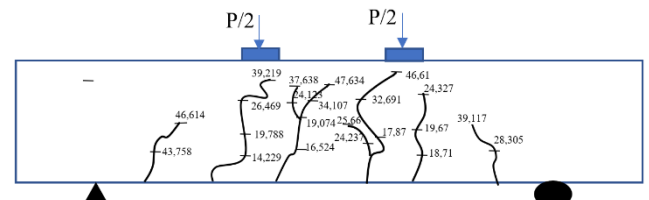
Balok Baja Ringan

BJ 02 – 1 mengalami kegagalan pada daerah tumpuan sisi kanan. Kegagalan ini ditandai retakan di sisi bawah lalu vertikal. Balok tersebut runtuh setelah menerima beban 43,809 kN dengan lendutan 19,4 mm. Setelah diperiksa bagian tulangannya, terungkap bahwa Baja ringan belum putus yang dapat dilihat pada Gambar 5.34. Hal ini mengindikasikan kemungkinan adanya retak lekatan atau slip antara baja ringan dan ikatan beton. Berikut merupakan

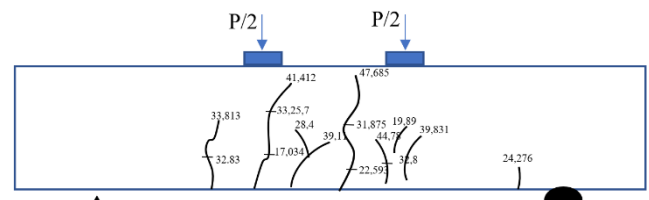
pola keruntuhan yang terjadi pada BJ 02-1 yang dapat dilihat pada Gambar 14 s.d. Gambar 16.



Gambar 14. Pola Keruntuhan BJ 02-1



Gambar 15. Pola Keruntuhan BJ 02-2



Gambar 16. Pola Keruntuhan BJ 02-3

Berdasarkan Gambar 11 hingga Gambar 16, pada fase awal pembebanan hingga mencapai batas leleh (zona elastis), retakan muncul secara perlahan pada daerah lapangan balok. Bagian yang muncul terlebih dahulu dimulai dari wilayah tarik dan bergerak ke wilayah tekan. Setelah mencapai batas leleh hingga fase ultimate (zona plastis), peningkatan pembebanan pada balok tidak terlalu signifikan, tetapi lendutan yang dialami oleh balok terus bertambah, hal ini menunjukkan bahwa tulangan telah leleh dan balok bersifat daktail. Setelah pembebanan mencapai ultimate, balok mengalami keruntuhan secara langsung dalam bentuk lentur, yang ditandai dengan rusaknya beton pada daerah lapangan beton. Hal ini juga mengindikasikan bahwa kondisi balok bertulang baja dan baja ringan bersifat under-reinforced karena terdapat beban leleh, dimana pembebanan tidak mengalami peningkatan yang signifikan, namun lendutan terus bertambah. Tetapi terdapat perbedaan pada BJ 02 – 1 yang dapat dilihat pada Gambar 14 yang mengalami pola keruntuhan lekatan, karena balok runtuh pada daerah tumpuan. Hal ini bisa terjadi karena baja ringan tidak mempunyai pengait untuk beton. Secara umum balok bertulang baja dan baja ringan mempunyai pola retak dan keruntuhan yang sama, tetapi balok bertulang baja ringan mempunyai kemungkinan untuk retak lekatan.

Analisis kekakuan Balok Bertulang Baja dan Baja Ringan (*Hollow*)

Kekakuan atau *stiffness* balok adalah perbandingan antara beban yang dialami balok baik pada retak pertama dan beban ultimate dibandingkan dengan lendutannya (Rizky, 2016). Berikut merupakan rincian kekakuan balok beton bertulang.

1. BJ 01 – 1
 - a. Kondisi saat retak pertama
 - Beban = 11,271 kN
 - Lendutan = 0,808 mm
 - Kekakuan = 11,271/0,808 = 13,9493 kN/mm
 - b. Kondisi saat *ultimate*
 - Beban = 44,472 kN
 - Lendutan = 26,22 mm
 - Kekakuan = 44,472/26,22 = 1,696 kN/mm

Perhitungan sampel lain pada balok baja tulangan (BJ 01) dan baja ringan (BJ 02) dianalisis dengan cara yang serupa. Hasil rekapitulasi perhitungan nilai kekakuan balok dapat dilihat pada **Tabel 5** berikut ini.

Tabel 5. Hasil Rekapitulasi Kekakuan Balok

Kode	Kekakuan Pada Retak Pertama (mm)	Kekakuan Pada Beban Ultimate (mm)
BJ 01 -1	13,949	1,696
BJ 01 -2	21,449	1,839
BJ 01 -3	15,099	1,772
Rata-rata	16,832	1,769
BJ 02 -1	17,988	2,258
BJ 02 -2	15,164	2,384
BJ 02 -3	19,059	2,5
Rata-rata	17,404	2,381

Berdasarkan tabel **Tabel 5** dapat disimpulkan bahwa balok beton dengan tulangan baja ringan mengalami kenaikan nilai kekakuan baik pada saat retak pertama maupun pada kondisi *ultimate*. Temuan mengenai kapasitas lendutan maksimum dan kekakuan dalam penelitian ini sejalan dengan pandangan yang diungkapkan Puluhalawa (2011), yang menyatakan jika balok dengan kekakuan yang rendah maka lendutan yang terjadi akan meningkat begitu juga sebaliknya.

KESIMPULAN

Dari hasil dan analisis penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan berdasarkan pembahasan pada bab sebelumnya disimpulkan bahwa,

1. Berdasarkan analisis momen lentur balok bertulang baja (BJ 01) mempunyai momen lentur teoritis yang lebih tinggi sebesar 0,678 kNm atau 7,923%, hal ini bisa terjadi karena perbedaan asumsi diameter baja yang digunakan. Sedangkan perbedaan momen lentur balok bertulang baja ringan (BJ 02) mempunyai momen lentur teoritis yang lebih rendah sebesar 0,08 kNm atau 0,08%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perhitungan antara momen nominal teoritis dan eksperimen telah sesuai karena hanya mempunyai selisih yang relatif kecil, dan pada BJ 02 nilai momen lentur eksperimennya lebih besar daripada momen lentur teoritis karena pada baja ringan yang digunakan diisi oleh mortar.
2. Berdasarkan analisis eksperimen momen nominal eksperimen pada sampel beton bertulang baja yaitu, BJ 01 diperoleh rata rata sebesar 7,886 kNm, BJ 02 diperoleh rata rata sebesar 9,726 kNm. Hal ini menunjukkan bahwa balok bertulang baja ringan meningkatkan momen nominal sebesar 1,84 kNm atau 18,91% dari balok tulangan baja. Hal ini menunjukkan

bahwa baja ringan dapat meningkatkan momen lentur dari baja tulangan.

3. Penggunaan baja ringan menghasilkan rata rata lendutan maksimal sebesar 19,853 mm, sedangkan balok beton dengan baja menghasilkan lendutan sebesar 25,753 mm. Sehingga, baja ringan menurunkan kapasitas lendutan maksimum sebesar 23% atau 5,9 mm. Hal ini menunjukkan baja ringan menurunkan lendutan daripada baja tulangan.
4. Nilai kekakuan yang dialami pada balok bertulang baja (BJ 01) pada retak pertama sebesar 16,832 kN/mm, sedangkan pada balok bertulang baja ringan (BJ 02) sebesar 17,404 kN/mm. Pada kondisi beban *ultimate* nilai kekakuan yang terjadi pada balok bertulang baja (BJ 01) sebesar 1,772 kN/mm, sedangkan pada balok bertulang baja ringan (BJ 02) sebesar 2,381 kN/mm. Dengan demikian menunjukkan bahwa balok dengan tulangan baja ringan memiliki nilai kekakuan yang lebih tinggi baik dalam kondisi elastis (pada retak pertama) maupun kondisi plastis (beban *ultimate*).

Saran

Dari kesimpulan tersebut, agar dapat mencapai hasil penelitian yang lebih optimal, beberapa saran diperlukan. Berikut adalah saran untuk penelitian selanjutnya.

1. Penelitian berikutnya mengenai uji tekan silinder, disarankan untuk menggunakan dial guna mengetahui nilai modulus elastis pada beton. Hal ini agar karakteristik beton dapat diketahui dengan jelas.
2. Dalam penelitian berikutnya, disarankan untuk memanfaatkan *straingauge* guna mengumpulkan data regangan pada tulangan. Pemasangan dan penempatan *straingauge* perlu diperhatikan secara cermat, karena jika terjadi kesalahan pemasangan maka hasil yang diperoleh tidak akurat. Pemasangan harus dilakukan dengan hati hati agar regangan dapat terbaca dengan baik saat pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- Basyaruddin, B., Khala, C. C. S., Muslimin, M. S., & Putri, A. P. (2021). "Uji lentur balok beton bertulang baja ringan dengan skema tulangan Tunggal". *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), 171-180.
- Edward G. Nawy. (2009). *Reinforced Concrete A Fundamental Approach (Sixth Edit)*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Jack C. McCormac; James K. Nelson. (2005). *Design of Reinforced Concrete ACI 318-05 (Seventh)*. John Wiley & Sons.
- Dewi, S. U., & Suandi, A. (2021). "Analisa Kuat Lentur Balok Beton Bertulang dengan Menggunakan Profil Baja Ringan sebagai Tulangan". *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 6(1), 24-34.
- Hastono, K. B. (2013). "Penggunaan Baja Ringan (*Cold-Formed*) Type Hollow Sebagai Tulangan Pada Balok Beton Bertulang Dalam Memikul Beban Lentur. *Kern*": *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 3(1).
- Irwan, I., Zulkifli, Z., dan Nurlaili, N. 2021. "Pengendalian Korosi Baja Karbon Rendah Dengan Menggunakan Inhibitor Korosi Monosodium Glutamat Dalam Lingkungan Crude Oil Pada Sistem Aliran

- Tersirkulasi”. In *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe* (Vol. 5, No. 1, pp. 77-80).
- Puluhulawa, I. 2011. *Kapasitas Lentur Perkuatan Pelat Beton Bertulang Menggunakan Kabel Baja dan Mortar*. Yogyakarta: Pascasarjana Universitas Gajah Mada.
- Puryanto, P., 2013. *Peranan Tulangan Tekan Pada Balok Terlentur Tulangan Rangkap untuk Membangkitkan Momen Nominal*. PILAR, 9(2).
- Putra, A. E. 2017. “Pemanfaatan Serat Aluminium Dari Usaha Mikro Menengah Di Kec. Tampan Sebagai Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan Beton” (*Doctoral dissertation*, Universitas Islam Riau).
- Rizky Fajar Pratama, S. P. 2016. *Analisis Kekakuan Struktur Balok Beton Bertulang Dengan Lubang Hollow Core Pada Tengah Balok*. Malang: Universitas brawijaya.
- Royani, A. 2020. “Pengaruh Suhu Terhadap Laju Korosi Baja Karbon Rendah Dalam Media Air Laut”. *Jurnal Simetrik*, 10(2), 344-349.
- Sambowo, K. A., Basuki, A., & Chrismaningwang, G. *Kuat Lentur dan Serapan Bunyi Panel Beton Agregat Polyethylene Terephthalate (PET)*.
- Setiawan, A. 2008. *Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD*. Erlangga.
- SNI 03-1974-2011, *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*, Badan. Standar Nasional, Indonesia.
- SNI 2847. 2019. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.