

KAJIAN LEBAR RETAK BALOK BETON AKIBAT PENGGUNAAN TULANGAN ALUMINIUM PADUAN

Novi Rahmayanti¹ dan Iman Satyarno²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Indonesia

Email: novi.rahmayanti@uii.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Email: iman@tsipil.ugm.ac.id

ABSTRACT

The use of concrete structures in a corrosive environment requires a minimum concrete cover thickness of 50 mm. Thick concrete cover is certainly very risky occurrence of spalling which result in reduced capacity of the cross section of the structure. For this study utilizes the aluminum alloy material as additional reinforcement bars that fill a third of thick concrete cover, where the aluminum has properties that are resistant to corrosion. The purpose of this study to obtain the contribution of aluminum alloy in the capacity of the concrete beam section and a wide crack that occurs without using reinforcement rebars. This study uses five pieces of beam specimen dimensions of 300 mm x 150 mm and a span length of 1600 mm. The beam using materials mortar, concrete and 13 mm diameters of aluminum alloy that were tested for bending strength. As for each of the aluminum ratio of 0% (B0); 0.34% (B1); 0.68% (B2); 1.02% (B3) and 1.36% (B4). Testing method requiring a single point of loading. The results showed that the load capacity of the test specimen when the first crack in the beam but not significantly increased with increasing amount of aluminum, which is equal to 1 times, 1,002 times, 1.01 times, 1.03 times and 1.07 times the beam ratio aluminum 0%. The maximum load capacity has increased along with increasing the number of aluminum, which is equal to 1 times, 1.64 times, 2.95 times, 4.00 times and 5.17 times its maximum capacity aluminum beam ratio of 0%. Rated maximum bending stress concrete (FCR) are eligible crack width 0.4 mm when conditions permit loading is an aluminum beam with a ratio of 0.68%; 1.02%; 1.36% 3.81 MPa; 3.89 MPa; 4.02 MPa.

Key words: aluminum alloy, crack width, the bending strength

PENDAHULUAN

Beton merupakan konstruksi yang sudah tidak asing lagi dalam bidang teknik sipil. Hampir setiap struktur bangunan sipil baik itu gedung, jembatan, maupun bangunan air menggunakan material berbahan beton. Beton yang digunakan untuk struktur bangunan dituntut memiliki sifat yang kuat dalam menahan beban-beban yang bekerja padanya, serta memiliki durabilitas yang tinggi agar beton dapat bekerja sesuai dengan waktu yang direncanakan.

Beton memiliki kelebihan diantaranya adalah material pembentuknya seperti

kerikil, pasir, semen, air yang mudah didapat, relatif mudah dalam pengerjaannya, dapat dibentuk sesuai dengan keinginan, dan tahan terhadap cuaca. Beton juga memiliki kelemahan dalam

penggunaannya, yaitu sifat beton yang getas dan kuat tarik yang rendah. Kelemahan pada beton tersebut sangat berbahaya untuk struktur yang tidak terlindung atau dekat dengan laut, karena struktur beton tersebut memiliki tebal selimut beton yang besar minimum 50 mm. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya kegagalan struktur dengan timbulnya retak-retak pada selimut beton akibat tegangan tarik pada masa layan.

Lebar retak yang melampaui batas pada struktur beton dapat menimbulkan bahaya korosi pada tulangan. Bila proses korosi dibiarkan dapat mengurangi kekuatan tulangan yang selanjutnya struktur akan mengalami keruntuhan. Adapun contoh kerusakan pada beton yang memiliki selimut beton yang tebal dapat dilihat pada Gambar 1.

Lebar retak adalah salah satu dari persyaratan kemampuan layan yang diperlukan pada perencanaan. Beton bertulang yang mengalami retak mikro akan mengalami perambatan retak yang cukup signifikan bila beban berulang diberikan terutama struktur yang terletak di lingkungan yang korosif (Soehardjono,2009)

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji kekuatan lentur dan kontrol retak beton yang mengalami tarik akibat adanya beban lentur dengan menggunakan material aluminium paduan batangan sebagai tambahan tulangan, serta penggunaan selimut beton setipis mungkin. Material aluminium dipilih karena sifat aluminium yang memiliki kuat tarik yang relatif tinggi, ringan, tahan terhadap korosi, dan mudah didapatkan di pasaran (Muller,2011).



Gambar 1. Kerusakan beton pada struktur di lingkungan agresif

KAPASITAS LENTUR BALOK TAMPANG PERSEGI

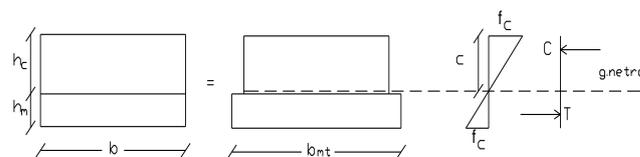
Secara umum prosedur analisis untuk penentuan kekuatan lentur balok beton berdasarkan atas tiga kondisi, yaitu kondisi retak, leleh, dan ultimit berikut ini.

1. Kondisi Retak

Berdasarkan Gambar 2 didapatkanlah persamaan untuk kondisi retak berikut ini.

- a. Menentukan rasio modular (penampang mortar ditransformasikan ke penampang beton) Maka lebar penampang transformasi menjadi

$$n = \frac{E_m}{E_c} \dots\dots(1)$$



Gambar 2. Diagram Tegangan Regangan Saat Kondisi Retak

$$b_{mt} = n \times b_m$$

- b. Menentukan f_{cr} secara teoritis SNI 2847-2002 dengan menggunakan rumus pendekatan untuk beton normal.

$$f_{cr} = 0.7 \sqrt{f'_c} \dots\dots(2)$$

- c. Menentukan ϵ_{cr}

$$\epsilon_{cr} = \frac{f_{cr}}{E_{cr}} \dots\dots(3)$$

dengan E_{cr} (rumus pendekatan terhadap beton normal) = $4700 \sqrt{f'_c}$

- d. Menghitung kekuatan blok tarik dan tekan

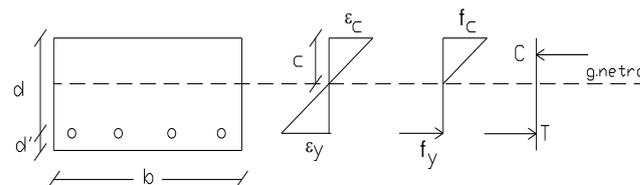
$$C = T = \frac{1}{2} f_c \times c \times b \dots\dots(4)$$

- e. Menghitung momen retak

$$M_{cr} = C \left(\frac{2}{3} c \right) + T \left(\frac{2}{3} h - c \right) \dots\dots(5)$$

2. Kondisi Leleh

Berdasarkan Gambar 3 didapatkanlah persamaan untuk kondisi leleh berikut ini.



Gambar 3. Diagram Tegangan Regangan Saat Kondisi Leleh

a. Menentukan luas tulangan As

$$A_s = n \times A_l \phi_{al} \dots\dots(6)$$

b. Menentukan regangan leleh aluminium

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_{al}} \dots\dots(7)$$

c. Menentukan blok beton saat leleh

$$\epsilon_c = \frac{c}{d-c} \epsilon_y \dots\dots(8)$$

$$f_c = \epsilon_c \times E_c \dots\dots(9)$$

$$C_c = 0,5 \times f_c \times c \times b \dots\dots(10)$$

d. Menghitung blok tarik

$$T = A_s \times f_y \dots\dots(11)$$

e. Menghitung Momen leleh

$$M = C_c \left(\frac{2}{3} c \right) + T(d-c) \dots\dots(12)$$

3. Kondisi Ultimit

Berdasarkan Gambar 4 didapatkanlah persamaan untuk kondisi ultimit berikut ini.

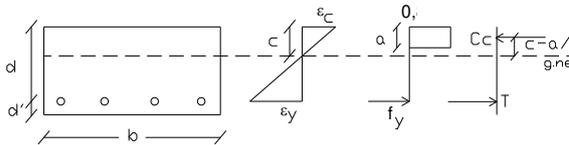
a. Menentukan nilai β_1

$$\beta_1 = 0,85 ; f'_c \leq 30 \text{ Mpa} \dots\dots(13)$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \frac{f'_c - 30}{7} ; f'_c > 30 \text{ MPa}$$

b. Menentukan nilai C_c

$$C_c = f'_c \times a \times b \dots\dots(14)$$



Gambar 4. Diagram regangan dan tegangan balok saat kondisi ultimit

c. Menghitung blok tarik

$$T = A_s \times f_y \dots\dots(15)$$

d. Menentukan tinggi blok desak

$$a = \beta_1 \times c \dots\dots(16)$$

e. Menghitung Momen leleh

$$M = C_c \left(c - \frac{a}{2} \right) + T(d-c) \dots\dots(17)$$

METODELOGI PENELITIAN

Benda uji terdiri dari lima buah balok yaitu balok B0, B1, B2, B3, dan B4 dengan dimensi 300 mm x 150 mm, panjang bentang 1600 mm. Rasio tulangan aluminium (ρ_{al}) pada balok B0 ialah sebesar 0%, balok B1 ialah sebesar 0,34 %,

balok B2 ialah sebesar 0,68 %, balok B3 ialah sebesar 1,02 %, balok B4 ialah sebesar 1,36 %. Digunakan material beton setebal 100 mm dan mortar setebal 50 mm. Mortar digunakan agar tulangan aluminium dapat terselimuti, dikarenakan tebal selimut beton hanya setebal 13 mm. Detail spesifikasi penampang tiap balok terlihat pada Gambar 5-9. Beban yang diaplikasikan pada balok adalah pembebanan monotonik satu titik dengan menggunakan alat pengujian lentur secara *loading-unloading* berdasarkan nilai kuat retak pertama kali balok B0 (P_{cr0}) dan kelipatannya ($1P_{cr}$, $2P_{cr}$, $3P_{cr}$, $4P_{cr}$) dengan toleransi sebesar $\pm 10\%$. Pembebanan ini dilakukan masing-masing sebanyak 3 siklus yaitu siklus C1, C2, dan C3, dilanjutkan dengan membaca lebar retak yang terjadi. Jika lebar retak yang terjadi saat pengujian *loading-unloading* besarnya lebih dari yang diijinkan yaitu sebesar 0,4 mm, maka dilanjutkan dengan pembebanan *loading* biasa hingga didapatkan kekuatan maksimumnya. Adapun *set up* pengujian dapat dilihat pada Gambar 10. Pada penelitian ini analisis dilakukan dengan analisis teoritis menggunakan metode plastis berdasarkan persamaan (1) – (17) dan program *Response-2000*. Dimana *software* ini digunakan untuk memperediksi kapasitas beban lentur yang terjadi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

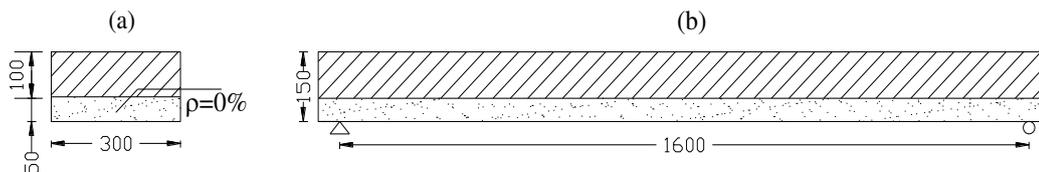
Hasil Pengujian Benda Uji

Balok B0 merupakan balok tanpa tulangan aluminium ($\rho_{al} = 0\%$), seperti yang terlihat di Gambar 5. Saat pengujian balok B0 seperti yang terlihat di Tabel 1, nilai P_{cr0} balok B0 akan digunakan sebagai nilai acuan beban *first crack* untuk balok B1, B2, B3, dan B4. Adapun kondisi retak pertama kali tercapai saat beban (P_{cr0}) sebesar 9,75 kN dan lendutan rerata sebesar 1,4 mm dengan lebar retak sebesar 0,4 mm. Setelah retak balok terbelah menjadi 2 bagian, dan tidak mampu untuk menahan beban kembali. Hal ini menandakan bahwa balok B0 merupakan struktur yang getas seperti yang terlihat di Gambar 11. Kapasitas beban yang terjadi saat pengujian memiliki rasio sebesar

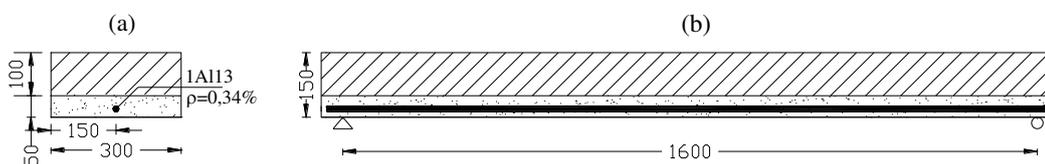
0,975 dan 0,94 kali kapasitas beban hasil terlihat pada gambar 12.
software dan analisa plastis seperti yang

Tabel 1. Data hasil pengujian balok B0

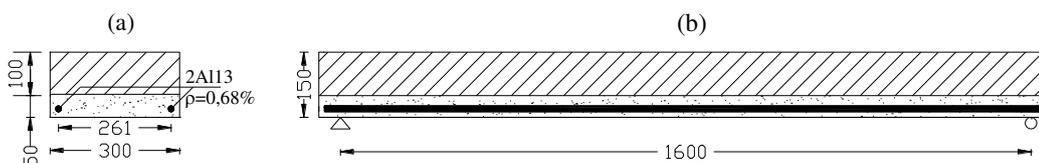
Pcr	No siklus	Loading				Lebar Retak (mm)
		P (kN)	LVDT (mm)			
			1.00	2.00	Rerata	
1	I	9.75	1.10	1.70	1.40	0.4



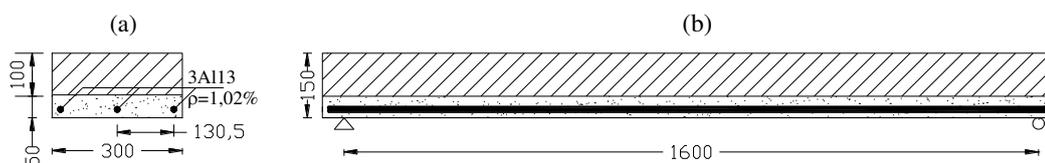
Gambar 5. Penampang melintang (a), memanjang (b) balok B0



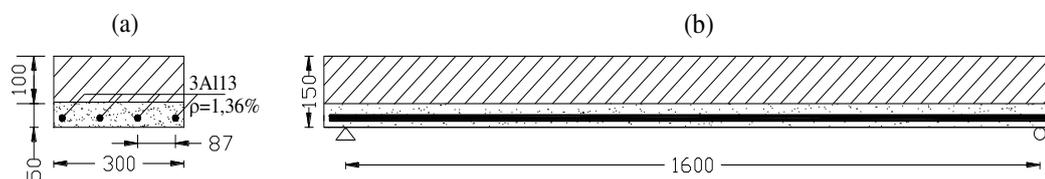
Gambar 6. Penampang melintang (a), memanjang (b) balok B1



Gambar 7. Penampang melintang (a), memanjang (b) balok B2



Gambar 8. Penampang melintang (a), memanjang (b) balok B3



Gambar 9. Penampang melintang (a), memanjang (b) balok B4





Gambar 11. Pola keruntuhan balok B0

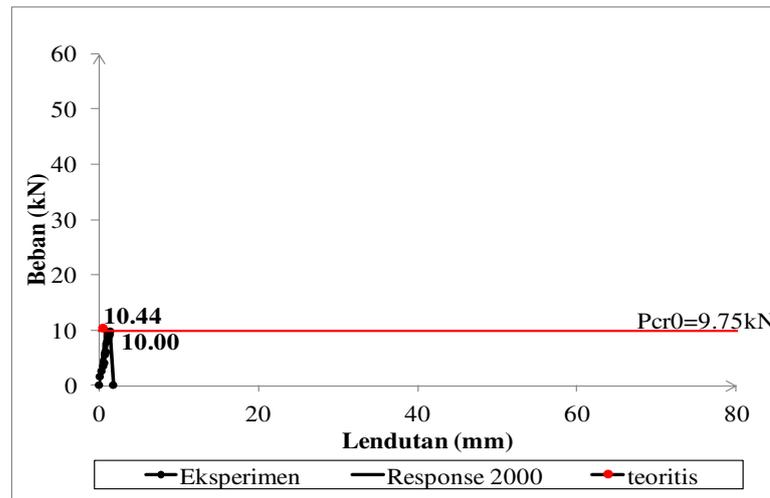
Balok B1 merupakan balok dengan 1 buah tulangan aluminium yang diletakkan di tengah penampang ($\rho_{al}=0,34\%$), seperti yang terlihat di Gambar 6. Besarnya beban P_{cr0} Balok B0 digunakan sebagai acuan untuk pembacaan beban saat retak pertama yang terjadi pada balok B1. Saat pengujian balok B1 mengalami beban *loading-unloading* $1P_{cr}$ dan dilakukan sebanyak 3 siklus ditiap pembebanannya yaitu siklus C1, C2, dan C3. Nilai $1P_{cr}$ balok B1 di setiap siklusnya besarnya tidak bisa sama persis dengan balok B0 yaitu sebesar 1,002 kalinya. Hal ini dikarenakan kesulitan mengepaskan pembebanan yang diberikan otomatis oleh *loadcell*. Berdasarkan hasil pengujian yang terdapat di Tabel 2 siklus ke-C1 untuk pembebanan $1P_{cr}$ balok B1 ditandai dengan kondisi retak pertama kali tercapai saat beban *loading* (L) $1P_{cr}$ ($1P_{cr,C1L}$) sebesar 9,77 kN dan pembacaan lendutan rerata sebesar 1,12 mm dengan lebar retak sebesar 0,08 mm, kemudian dilanjutkan dengan beban *unloading* (U) $1P_{cr}$ ($1P_{cr,C1U}$) hingga mencapai 0 kN dan lendutan rerata sebesar 0,60 mm dengan lebar retak sebesar 0,06 mm. Selanjutnya dilakukan siklus ke-C2 untuk pembebanan $1P_{cr}$ balok B1 dengan beban *loading* ($1P_{cr,C2L}$) sebesar 9,75 kN dan lendutan rerata sebesar 2,81 mm dengan lebar retak sebesar 0,4 mm, kemudian dilanjutkan dengan beban *unloading* $1P_{cr}$ ($1P_{cr,C2U}$) hingga mencapai 0,06 kN dan lendutan rerata sebesar 1,41 mm dengan lebar retak sebesar 0,20 mm. Selanjutnya dilakukan siklus ke-C3 untuk pembebanan $1P_{cr}$ balok B1 dengan beban *loading* ($1P_{cr,C3L}$) sebesar 9,79 kN dan

lendutan rerata sebesar 3,01 mm dengan lebar retak sebesar 0,48 mm. kemudian dilanjutkan dengan beban *unloading* $1P_{cr}$ ($1P_{cr,C3U}$) hingga mencapai 0,06 kN dan lendutan rerata sebesar 1,45 mm dengan lebar retak sebesar 0,24 mm. Dikarenakan beban saat *loading* siklus ke-C3 lebar retaknya sudah lebih besar dari 0,40 mm, maka tidak dilakukan pembebanan $2P_{cr}$ dan langsung dilakukan pembebanan biasa untuk mendapatkan beban maksimum. Beban maksimum yang mampu dicapai balok B1 ialah sebesar 16,01 kN atau setara 1,64 kalinya beban maksimum balok B0. Pola keruntuhan pada Gambar 13 balok B1, merupakan mekanisme keruntuhan lentur tetapi getas. Hal ini ditandai dengan retak terjadi pada tengah bentang yang arahnya tegak lurus terhadap sumbu utama balok, akan tetapi aluminiumnya belum mengalami leleh. Kapasitas beban yang terjadi saat pengujian memiliki rasio sebesar 1,13 dan 1,14 kali kapasitas beban hasil *software* dan analisa plastis seperti yang terlihat pada gambar 14.

Balok B2 merupakan balok dengan 2 buah tulangan aluminium yang diletakkan di tepi penampang ($\rho_{al} = 0,68\%$), seperti yang terlihat di Gambar 7. Pembacaan beban saat retak pertama $1P_{cr}$ yang terjadi pada balok B2 mengacu pada nilai beban P_{cr0} Balok B0, akan tetapi nilainya tidak persis sama yaitu sebesar 1,01 kali P_{cr0} . Pengujian balok B2 mengalami beban *loading-unloading* $1P_{cr}$ dan $2P_{cr}$ yang dilakukan sebanyak 3 siklus ditiap pembebanannya yaitu siklus C1, C2, dan C3. Adapun nilai beban *loading* $1P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 9,85 kN dilanjutkan dengan pengujian

unloading $1P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 0,00 kN, dilakukan pembacaan *loading* $1P_{cr}$ siklus C2 sebesar 9,83 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $1P_{cr}$ siklus C2 sebesar 0,02 kN, dan dilakukan pembacaan *loading* $1P_{cr}$ siklus

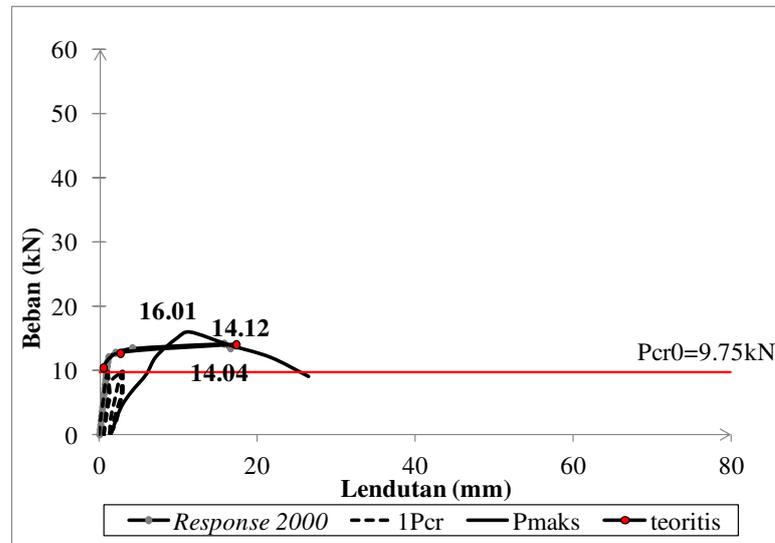
C3 sebesar 9,85 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $1P_{cr}$ siklus C3 sebesar 0,02 kN. Dari tiap pengujian tersebut dilakukan pembacaan nilai lendutan dan lebar retak yang terjadi.



Gambar 12. Perbandingan beban-lendutan hasil analisis dan eksperimen B0



Gambar 13. Pola keruntuhan balok B1



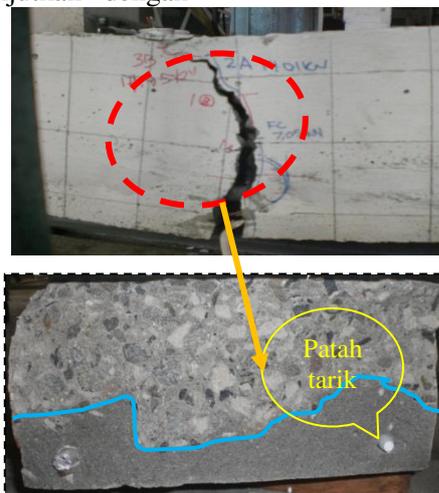
Gambar 14. Perbandingan beban-lendutan hasil analisis dan eksperimen B1

Balok B2 mampu untuk melakukan pengujian sampai ketahap $2P_{cr}$, karena saat pengujian $1P_{cr}$ kondisi *loading* ($1P_{cr}C3L$) maupun *unloading* ($1P_{cr}C3U$) di siklus C3 lebar retak yang terjadi masih kurang dari 0,4 mm seperti yang terlihat pada tabel 3. Untuk kondisi $1P_{cr}C3L$ lebar retak yang terjadi ialah sebesar 0,12 mm, sedangkan kondisi $1P_{cr}C3U$ lebar retak yang terjadi ialah sebesar 0,08 mm, kemudian dilakukanlah pengujian tahap $2P_{cr}$ yang nilainya sebesar 2 kali lipat nilai $1P_{cr}$. Nilai pembebanan $2P_{cr}$ balok B2 yaitu nilai beban *loading* $2P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 20,01 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 0,01 kN, dilakukan pembacaan *loading* $2P_{cr}$ siklus C2 sebesar 20,03 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus C2 sebesar 0,01 kN, dan dilakukan pembacaan *loading* $2P_{cr}$ siklus C3 sebesar 20,03 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus C3 sebesar 0,01 kN. Dari tiap pengujian tersebut dilakukan pembacaan nilai lendutan dan lebar retak yang terjadi. Dikarenakan saat pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus ke-C3 ($2P_{cr}C3U$) lebar retaknya sudah mencapai 0,40 mm, maka tidak dilakukan pembebanan tahap $3P_{cr}$, akan tetapi langsung dilakukan

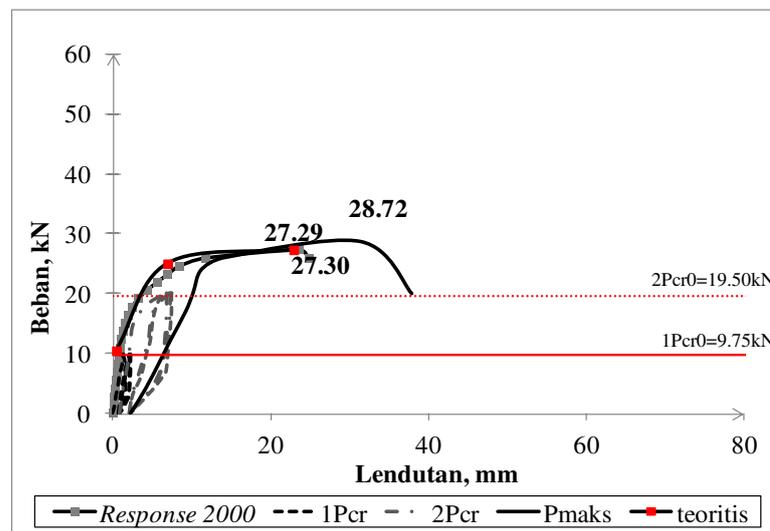
pembebanan biasa untuk mendapatkan beban maksimum. Beban maksimum yang mampu dicapai balok B2 ialah sebesar 28,72 kN atau setara 2,95 kalinya beban maksimum balok B0. Secara garis besar pola keruntuhan pada Gambar 15 balok B2, merupakan mekanisme keruntuhan lentur. Hal ini ditandai dengan retak terjadi pada tengah bentang dengan satu aluminiumnya mengalami leleh saat beban mendekati beban maksimumnya. Kapasitas beban yang terjadi saat pengujian memiliki rasio sebesar 1,05 dan 1,05 kali kapasitas beban hasil *software* dan analisa plastis seperti yang terlihat pada gambar 16. Balok B3 merupakan balok dengan 3 buah tulangan aluminium yang diletakkan di tepi penampang ($\rho_{al} = 1,02\%$), seperti yang terlihat di Gambar 8. Pembacaan beban saat retak pertama $1P_{cr}$ yang terjadi pada balok B3 mengacu pada nilai beban P_{cr0} Balok B0, akan tetapi nilainya tidak persis sama yaitu sebesar 1,03 kali P_{cr0} . Pengujian balok B3 mengalami beban *loading-unloading* $1P_{cr}$, $2P_{cr}$ dan $3P_{cr}$ yang dilakukan sebanyak 3 siklus ditiap pembebanannya yaitu siklus C1, C2, dan C3. Adapun nilai beban *loading* $1P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 10,08 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $1P_{cr}$ siklus C1 ialah

sebesar 0,00 kN, dilakukan pembacaan *loading* $1P_{cr}$ siklus C2 sebesar 10,19 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $1P_{cr}$ siklus C2 sebesar 0,03 kN, dan dilakukan pembacaan *loading* $1P_{cr}$ siklus C3 sebesar 10,08 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $1P_{cr}$ siklus C3 sebesar 0,01 kN. kemudian dilakukanlah pengujian tahap $2P_{cr}$ yang nilainya sebesar 2 kali lipat nilai $1P_{cr}$. Adapun nilai beban *loading* $2P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 20,03 kN dilanjutkan dengan

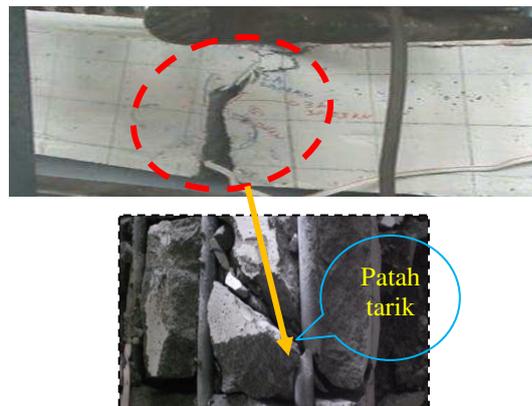
pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 0,00 kN, dilakukan pembacaan *loading* $2P_{cr}$ siklus C2 sebesar 20,02 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus C2 sebesar 0,00 kN, dan dilakukan pembacaan *loading* $2P_{cr}$ siklus C3 sebesar 20,08 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus C3 sebesar 0,02 kN. Dari tiap pengujian tersebut dilakukan pembacaan nilai lendutan dan lebar retak yang terjadi.



Gambar 15. Pola keruntuhan balok B2



Gambar 16. Perbandingan beban-lendutan hasil analisis dan eksperimen B2



Gambar 17. Pola keruntuhan balok B3

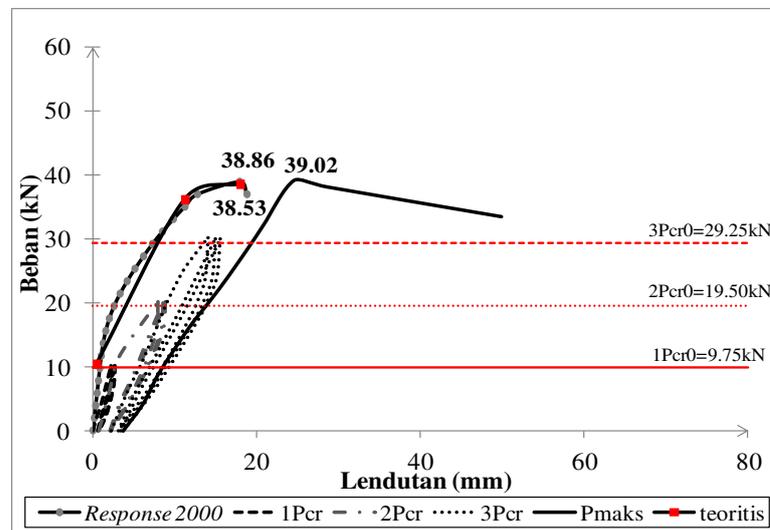
Balok B3 mampu untuk melakukan pengujian sampai ketahap $3P_{cr}$. Hal ini dikarenakan saat pengujian $2P_{cr}$ *unloading* ($2P_{cr}, C3U$) di siklus C3 lebar retak yang terjadi masih kurang dari 0,4 mm yaitu sebesar 0,3 mm seperti yang terlihat pada tabel 4. Kemudian dilakukanlah pengujian tahap $3P_{cr}$ yang nilainya sebesar 3 kali lipat nilai $1P_{cr}$. Nilai pembebanan $3P_{cr}$ balok B3 yaitu nilai beban *loading* $3P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 30,03 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $3P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 0,01 kN, dilakukan pembacaan *loading* $3P_{cr}$ siklus C2 sebesar 30,01 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $3P_{cr}$ siklus C2 sebesar 0,02 kN, dan dilakukan pembacaan *loading* $3P_{cr}$ siklus C3 sebesar 30,00 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $3P_{cr}$ siklus C3 sebesar 0,01 kN. Dari tiap pengujian tersebut dilakukan pembacaan nilai lendutan dan lebar retak yang terjadi. Dikarenakan saat pengujian *unloading* $3P_{cr}$ siklus ke-C3 ($3P_{cr}, C3U$) lebar retaknya sudah mencapai 0,50 mm, maka tidak dilakukan pembebanan tahap $4P_{cr}$, akan tetapi langsung dilakukan pembebanan biasa untuk mendapatkan beban maksimum. Beban maksimum yang mampu dicapai balok B3 ialah sebesar 39,02 kN atau setara 4,00 kalinya beban maksimum balok B0. Secara garis besar pola keruntuhan pada Gambar 17 balok B3, merupakan mekanisme keruntuhan lentur. Hal ini ditandai

dengan retak terjadi pada tengah bentang dengan beberapa aluminiumnya mengalami leleh saat beban mendekati beban maksimumnya. Kapasitas beban yang terjadi saat pengujian memiliki rasio sebesar 1,004 dan 1,013 kali kapasitas beban hasil *software* dan analisa plastis seperti yang terlihat pada gambar 18.

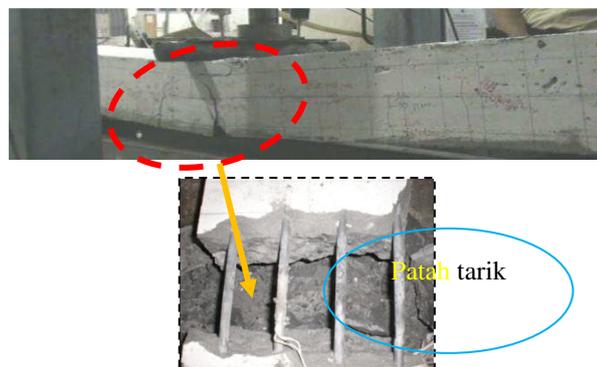
Balok B4 merupakan balok dengan 4 buah tulangan aluminium yang diletakkan di tepi penampang ($\rho_{al} = 1,36\%$), seperti yang terlihat di Gambar 9. Pembacaan beban saat retak pertama $1P_{cr}$ yang terjadi pada balok B4 mengacu pada nilai beban P_{cr0} Balok B0, akan tetapi nilainya tidak persis sama yaitu sebesar 1,07 kali P_{cr0} . Pengujian balok B4 mengalami beban *loading-unloading* $1P_{cr}$, $2P_{cr}$, $3P_{cr}$ dan $4P_{cr}$ yang dilakukan sebanyak 3 siklus di tiap pembebanannya yaitu siklus C1, C2, dan C3. Adapun nilai beban *loading* $1P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 10,45 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $1P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 0,00 kN, dilakukan pembacaan *loading* $1P_{cr}$ siklus C2 sebesar 9,97 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $1P_{cr}$ siklus C2 sebesar 0,03 kN, dan dilakukan pembacaan *loading* $1P_{cr}$ siklus C3 sebesar 10,47 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $1P_{cr}$ siklus C3 sebesar 0,00 kN. kemudian dilakukanlah pengujian tahap $2P_{cr}$ yang nilainya sebesar 2 kali lipat nilai $1P_{cr}$. Adapun nilai beban *loading* $2P_{cr}$ siklus C1 ialah

sebesar 20,56 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 0,06 kN, dilakukan pembacaan *loading* $2P_{cr}$ siklus C2 sebesar 20,63 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus C2 sebesar 0,01 kN, dan dilakukan pembacaan *loading* $2P_{cr}$ siklus C3 sebesar 21,29 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $2P_{cr}$ siklus C3 sebesar 0,00 kN. Kemudian dilakukanlah pengujian tahap $3P_{cr}$ yang nilainya sebesar 3 kali lipat nilai $1P_{cr}$. Nilai pembebanan $3P_{cr}$ balok B3 yaitu nilai

beban *loading* $3P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 30,15 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $3P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 0,02 kN, dilakukan pembacaan *loading* $3P_{cr}$ siklus C2 sebesar 30,16 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $3P_{cr}$ siklus C2 sebesar 0,01 kN, dan dilakukan pembacaan *loading* $3P_{cr}$ siklus C3 sebesar 30,14 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $3P_{cr}$ siklus C3 sebesar 0,02 kN. Dari tiap pengujian tersebut dilakukan pembacaan nilai lendutan dan lebar retak yang terjadi.



Gambar 18. Perbandingan beban-lendutan hasil analisis dan eksperimen B3



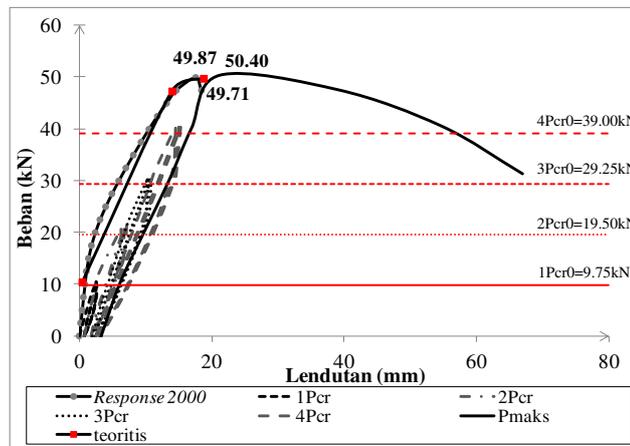
Gambar 19. Pola keruntuhan balok B4

Balok B4 mampu untuk melakukan pengujian sampai ketahap $4P_{cr}$, karena saat pengujian $3P_{cr}$ *unloading* ($3P_{cr}C3U$)

di siklus C3 lebar retak yang terjadi masih kurang dari 0,4 mm yaitu sebesar 0,12 mm seperti yang terlihat pada tabel

5. Kemudian dilakukanlah pengujian tahap ke $4P_{cr}$ yang nilainya sebesar 4 kali lipat nilai $1P_{cr}$. Nilai pembebanan $4P_{cr}$ balok B3 yaitu nilai beban *loading* $4P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 40,05 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $4P_{cr}$ siklus C1 ialah sebesar 0,03 kN, dilakukan pembacaan *loading* $4P_{cr}$ siklus C2 sebesar 40,23 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $4P_{cr}$ siklus C2 sebesar 0,05 kN, dan dilakukan pembacaan *loading* $4P_{cr}$ siklus C3 sebesar 40,25 kN dilanjutkan dengan pengujian *unloading* $3P_{cr}$ siklus C3 sebesar 0,01 kN. Dari tiap pengujian tersebut dilakukan pembacaan nilai lendutan dan lebar retak yang terjadi. Saat pengujian *unloading* $3P_{cr}$ siklus ke-C3 ($3P_{cr}C3U$) lebar retaknya mencapai 0,30 mm, akan tetapi tidak dilakukan pembebanan tahap $4P_{cr}$. Hal ini dilakukan

dengan memepertimbangkan nilai estimasi beban maksimum yang mungkin terjadi ialah sebesar 49,71 kN. Untuk itu langsung dilakukan pembebanan biasa untuk mendapatkan beban maksimum. Beban maksimum hasil eksperimen yang mampu dicapai balok B4 ialah sebesar 50,40 kN atau setara 5,17 kalinya beban maksimum balok B0. Secara garis besar pola keruntuhan pada Gambar 19 balok B4, merupakan mekanisme keruntuhan lentur. Hal ini ditandai dengan retak terjadi pada tengah bentang dengan beberapa aluminiumnya mengalami leleh saat beban mendekati beban maksimumnya. Kapasitas beban yang terjadi saat pengujian memiliki rasio sebesar 1,011 dan 1,014 kali kapasitas beban hasil *software* dan analisa plastis seperti yang terlihat pada gambar 20.



Gambar 20. Perbandingan beban-lendutan hasil analisis dan eksperimen B4

Tabel 2. Data hasil pengujian balok B1

Pcr	siklus	LOADING (L)					UNLOADING (U)				
		P (kN)	Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)	P (kN)	Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)
			LVDT 1	LVDT 2	Rerata			LVDT 1	LVDT 2	Rerata	
1Pcr	C1	9,77	0,87	1,36	1,12	0,08	0,00	0,47	0,72	0,60	0,06
	C2	9,75	2,51	3,10	2,81	0,40	0,06	1,23	1,58	1,41	0,20
	C3	9,79	2,69	3,32	3,01	0,48	0,06	1,26	1,63	1,45	0,24
Pmaks		16,01	10,94	12,00	11,47						

Tabel 3. Data hasil pengujian balok B2

Pcr	siklus	LOADING (L)					UNLOADING (U)				
		P (kN)	Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)	P (kN)	Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)
			LVDT 1	LVDT 2	Rerata			LVDT 1	LVDT 2	Rerata	
1Pcr	C1	9,85	1,06	1,64	1,35	0,04	0,00	0,54	0,77	0,66	0,02
	C2	9,83	1,72	2,31	2,02	0,10	0,02	0,72	0,97	0,85	0,06
	C3	9,85	1,87	2,51	2,19	0,12	0,02	0,78	1,07	0,93	0,08
2Pcr	C1	20,01	6,31	7,17	6,74	0,90	0,01	1,91	2,18	2,05	0,30
	C2	20,03	6,78	7,68	7,23	1,30	0,01	1,93	2,23	2,08	0,36
	C3	20,02	7,04	7,90	7,47	1,60	0,01	2,06	2,32	2,19	0,40
Pmaks		28,72	30,76	31,95	31,36						

Tabel 4. Data hasil pengujian balok B3

Pcr	siklus	LOADING (L)					UNLOADING (U)				
		P (kN)	Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)	P (kN)	Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)
			LVDT 1	LVDT 2	Rerata			LVDT 1	LVDT 2	Rerata	
1Pcr	C1	10,08	2,11	2,45	2,28	0,02	0,00	0,47	0,81	0,64	0,00
	C2	10,19	2,46	2,83	2,65	0,03	0,03	0,59	0,94	0,77	0,02
	C3	10,08	2,54	2,90	2,72	0,08	0,01	0,63	0,99	0,81	0,04
2Pcr	C1	20,03	7,86	8,16	8,01	0,70	0,00	1,93	2,27	2,10	0,24
	C2	20,02	8,48	8,73	8,61	0,90	0,00	2,09	2,37	2,23	0,26
	C3	20,08	8,77	9,02	8,90	0,90	0,02	2,16	2,43	2,30	0,30
3Pcr	C1	30,03	14,00	14,12	14,06	1,70	0,01	3,11	3,25	3,18	0,30
	C2	30,01	14,89	14,97	14,93	1,80	0,02	3,43	3,47	3,45	0,40
	C3	30,00	15,48	15,52	15,50	1,90	0,01	3,68	3,68	3,68	0,50
Pmaks		39,02	24,55	24,67	24,61						

Tabel 5. Data hasil pengujian balok B4

Pcr	siklus	LOADING (L)					UNLOADING (U)				
		P (kN)	Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)	P (kN)	Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)
			LVDT 1	LVDT 2	Rerata			LVDT 1	LVDT 2	Rerata	
1Pcr	C1	10,45	2,09	2,85	2,47	0,02	0,00	0,54	0,97	0,76	0,00
	C2	9,97	2,08	2,85	2,47	0,03	0,03	0,55	0,98	0,77	0,02
	C3	10,47	2,20	2,97	2,59	0,04	0,00	0,60	1,04	0,82	0,02
2Pcr	C1	20,56	5,79	6,79	6,29	0,20	0,06	1,52	2,10	1,81	0,06
	C2	20,63	6,15	7,19	6,67	0,30	0,01	1,57	2,15	1,86	0,08
	C3	21,29	6,54	7,60	7,07	0,40	0,00	1,60	2,20	1,90	0,08
3Pcr	C1	30,15	9,65	10,84	10,25	0,40	0,02	2,04	2,63	2,34	0,10
	C2	30,16	9,98	11,23	10,61	0,56	0,01	2,12	2,77	2,45	0,11
	C3	30,14	10,20	11,46	10,83	0,62	0,02	2,13	2,79	2,46	0,12
4Pcr	C1	40,05	13,79	15,18	14,49	0,78	0,03	2,61	3,31	2,96	0,15
	C2	40,23	14,29	15,70	15,00	0,84	0,05	2,79	3,55	3,17	0,26
	C3	40,25	14,57	16,00	15,29	0,90	0,01	2,87	3,66	3,27	0,30
Pmaks		50,40	20,37	22,05	21,21						

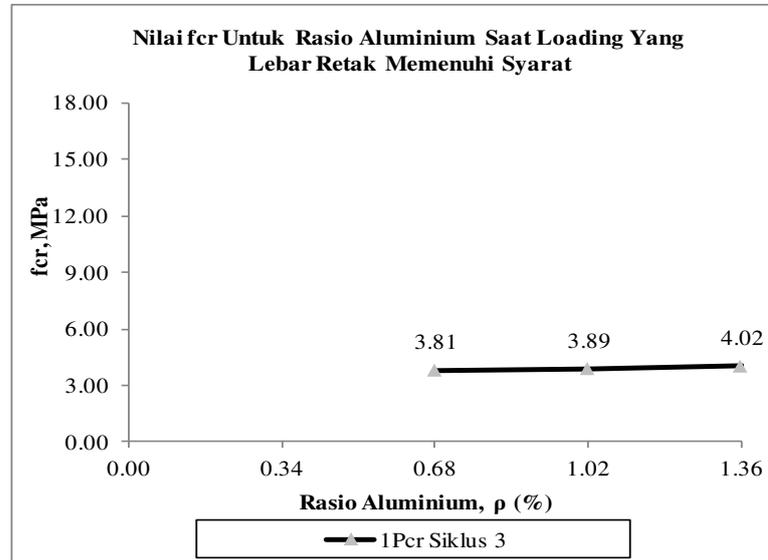
Lebar Retak Ijin

SNI 2847-2002 mensyaratkan lebar retak yang diijinkan nilainya tidak boleh lebih dari 0,4 mm. Maka pada penelitian ini balok yang memenuhi nilai tersebut untuk kondisi

loading adalah balok B2, B3, dan B4 dengan rasio tulangan masing-masing adalah 0,68 % ; 1,02 % ; 1,36%. Ke tiga buah balok tersebut masih memenuhi nilai lebar retaknya sampai pemberian beban saat kondisi 1P_{cr} di siklus ke C3, jika lebih dari

$1P_{cr}$ maka nilai lebar retaknya sudah lebih dari yang diijinkan. Adapun nilai tegangan lentur beton maksimum yang memenuhi syarat lebar retak ijin saat kondisi *loading*

ialah balok dengan rasio aluminium sebesar 0,68 % ; 1,02 % ; 1,36% adalah 3,81 MPa ; 3,89 MPa; 4,02 Mpa seperti yang terlihat pada gambar 21 dan 22.



Gambar 21. Nilai f_{cr} untuk balok eksperimen yang lebar retaknya memenuhi syarat

KESIMPULAN

Dari hasil pengujian eksperimen dapat ditarik beberapa kesimpulan untuk penelitian ini antara lain.

1. Pola retak lentur umumnya terjadi pada daerah tengah bentang.
2. Nilai beban *first crack* tiap balok berbeda. Hal ini dikarenakan elevasi mortar yang tidak rata dan penggunaan jumlah tulangan aluminium yang berbeda-beda ditiap baloknya. Adapun nilainya masing-masing ialah setara dengan 1 kali, 1,002 kali, 1,01 kali, 1,03 kali, dan 1,07 kali balok rasio aluminium 0,00 %.
3. Kapasitas beban maksimum hasil pengujian mengalami peningkatan yang cukup signifikan seiring dengan banyaknya jumlah aluminium pada balok. Adapun nilainya masing-masing ialah setara dengan 1 kali, 1,64 kali, 2,95 kali, 4,00 kali, dan 5,17 kali balok rasio aluminium 0,00 %.

4. Nilai tegangan lentur beton maksimum yang memenuhi syarat lebar retak ijin saat kondisi *loading* ialah balok dengan rasio aluminium sebesar 0,68 % ; 1,02 % ; 1,36% adalah 3,81 MPa ; 3,89 MPa; 4,02 MPa.

SARAN

Saran-saran yang dapat disampaikan sehubungan dengan penelitian yang telah dilakukan antara lain:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai variasi penggunaan aluminium baik dari mutu maupun ukuran dan diameternya terhadap durabilitas beton.
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai efektifitas retak, penggunaan mortar dan aluminium pada daerah pembungkus beton pada struktur beton bertulang.
3. Perlu dilakukan pengujian slip pada tulangan aluminium, untuk memastikan tidak terjadinya slip antara aluminium dengan beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, (2002), “SNI 03-2847-2002
*Tata Cara Perhitungan Struktur
Beton untuk Bangunan Gedung*”,
Badan Standarisasi Nasional, Jakarta
- Mazzolani, F. M., (2006), “Structural
Applications of Aluminium in Civil
Engineering”, *Structural
Engineering International*, Vol 16,
No.4, pp. 280-285(6).
- Muller, U., (2011), “*Introduction to
structural Aluminium Design*”,
Whittles Publishing, Scotland, UK.
- Soehardjono, A., (2009), “Life Time
Prediction of Structural Concrete
Element Due to Repeated Loadings”,
Dinamika Teknik Sipil, Vol. 9, No.
1, pp. 38 – 47., Surakarta