

**PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BETON NORMAL
BERTULANG DENGAN ABU TERBANG (*FLY ASH*)**

*FLEXURAL AND SHEAR BEHAVIOR OF NORMAL REINFORCED CONCRETE
BEAM WITH FLY ASH*

Artikel Ilmiah

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
Mencapai derajat sarjana S-1 Jurusan Teknik Sipil



Oleh:

M. Asyari
F1A 118 053

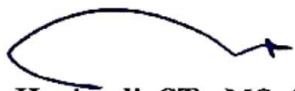
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MATARAM
2023

Artikel Ilmiah

**PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BETON NORMAL
BERTULANG DENGAN ABU TERBANG (*FLY ASH*)**
*FLEXURAL AND SHEAR BEHAVIOR OF NORMAL REINFORCED CONCRETE
BEAM WITH FLY ASH*

Telah diperiksa dan disetujui oleh Tim Pembimbing:

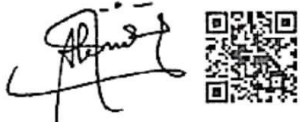
1. Pembimbing Utama



Hariyadi, ST., MSc(Eng)., Dr. Eng
NIP. 19731027 199802 1 001

Tanggal: 13 November 2023

2. Pembimbing Pendamping



Prof. Akmaluddin, ST., MSc(Eng)., Ph.D
NIP. 19681231 199412 1 001

Tanggal: 13 November 2023

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Mataram



Hariyadi, ST., MSc(Eng)., Dr. Eng
NIP. 19731027 199802 1 001

Artikel Ilmiah

**PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BETON NORMAL
BERTULANG DENGAN ABU TERBANG (*FLY ASH*)**

Oleh:

**M. Asyari
F1A 118 053**

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Pada tanggal 9 November 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat mencapai derajat sarjana S-1
Jurusan Teknik Sipil

Susunan Tim Penguji

1. Penguji I


Pathurahman, ST., MT.
NIP. 19661231 199403 1 018

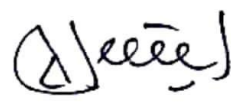
Tanggal: 14 November 2023

2. Penguji II


Prof. Ni Nyoman Kencanawati, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19760804 200003 2 001

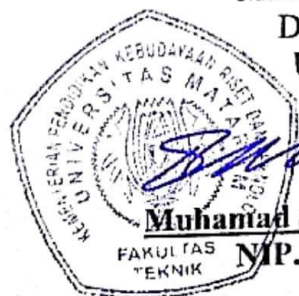
Tanggal: 14 November 2023

3. Penguji III


Fathmah Mahmud, ST., MT.
NIP. 19711109 200012 2 001

Tanggal: 14 November 2023

Mataram, 15 November 2023
Dekan Fakultas Teknik
Universitas Mataram



Muhantad Syamsu Iqbal, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19720222 199903 1 002

PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BETON NORMAL BERTULANG DENGAN ABU TERBANG (*FLY ASH*)

FLEXURAL AND SHEAR BEHAVIOR OF NORMAL REINFORCED CONCRETE BEAM WITH FLY ASH

M. Asyari¹, Suryawan Murtiadi², Akmaluddin²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Mataram

²Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Mataram

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

Email: ariasyari34@gmail.com

ABSTRAK

Balok beton akan mengalami keretakan lentur di sepanjang serat tarik balok jika penambahan beban yang terus-menerus karena balok tersebut menahan regangan dan defleksi tambahan. Dan dengan penambahan beban yang melebihi beban yang telah direncanakan sebelumnya, strukturnya bisa runtuh. Oleh karena itu, struktur itu perlu diperkuat untuk memperpanjang umur manfaatnya. Seiring dengan berkembangnya zaman, telah banyak dilakukan inovasi-inovasi untuk meningkatkan kinerja beton. Salah satunya yakni pemanfaatan abu terbang (*fly ash*) sebagai material tambahan untuk meningkatkan mutu beton.

Benda uji berupa balok beton bertulang dengan ukuran 120 mm x 180 mm x 1700 mm. Abu terbang (*fly ash*) yang digunakan berasal dari PLTU Jeranjang di Desa Taman Ayu, Gerung, Lombok Barat, Nusa Tenggara Barat dengan variasi campuran sebesar 15% terhadap semen. Benda uji diletakkan di alat pengujian berupa frame load yang kemudian diberi dua titik pembebanan secara simetris dengan jarak 1/3 bentang.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa balok beton bertulang dengan penambahan *fly ash* memiliki kapasitas lebih besar apabila dibandingkan dengan balok beton biasa (BN). Balok dengan penambahan *fly ash* mampu meningkatkan kapasitas lentur serta daktilitas berturut-turut sebesar 2,91% dan 66,81% pada balok lentur *fly ash* (BF-L), sedangkan pada balok geser *fly ash* (BF-G) meningkat sebesar 20,12% dan 32,30%. Selain itu, momen retak (M_{cr}) pada balok *fly ash* juga lebih besar dari beton normal yakni sebesar 86,43%, sedangkan pada balok geser (BF-G) mengalami peningkatan sebesar 78,37%. Kekakuan balok lentur *fly ash* (BF-L) mengalami peningkatan sebesar 2,78% dari balok lentur normal (BN-L) sedangkan kekakuan balok geser *fly ash* (BF-G) mengalami penurunan sebesar 34,87% dari balok geser normal (BN-G). Pola retak pada seluruh benda uji menunjukkan pola retak lentur (*flexural crack*). Hal ini ditunjukkan dengan arah retakan vertikal dari daerah tarik balok menuju ke daerah tekan. Dengan demikian model kegagalan yang terjadi adalah kegagalan lentur dan tidak terjadi kegagalan geser.

Kata Kunci: Beton bertulang, *fly ash*, kuat lentur, momen retak, daktilitas, kekakuan lentur

ABSTRACT

Concrete beams will experience flexural cracks along the tensile fibers of the beam if the load continues to increase because the beam withstands additional strain and deflection. And with the addition of loads that exceed the previously planned loads, the structure can collapse. Therefore, the structure needs to be strengthened to extend its useful life. As time goes by, many innovations have been made to improve the performance of concrete. One of them is the use of fly ash (fly ash) as an additional material to improve the quality of concrete.

The test object is a reinforced concrete beam with dimensions of 120 mm x 180 mm x 1700 mm. Fly ash (fly ash) used comes from the Jeranjang PLTU in Taman Ayu Village, Gerung, West Lombok, West Nusa Tenggara within mix variation of 15% to cement. The test object is placed in a testing tool in the form of frame load which is then given two loading points symmetrically with a distance of $\frac{1}{3}$ of the span.

The test results show that reinforced concrete blocks with the addition of fly ash have a larger capacity when compared to ordinary concrete blocks (BN). Beams with the addition of fly ash were able to increase bending capacity and ductility by 2.91% and 66.81% respectively in fly ash bending beams (BF-L), while in fly ash shear beams (BF-G) increased by 20.12% and 32.30%. In addition, the crack moment (M_{cr}) in fly ash beams is also greater than normal concrete, which is 86.43%, while in sliding beams (BF-G) has increased by 78.37%. The stiffness of the fly ash bending beam (BF-L) increased by 2.78% from the normal bending beam (BN-L) while the stiffness of the fly ash shear beam (BF-G) decreased by 34.87% from the normal shear beam (BN-G). The crack pattern on all specimens shows a flexural crack pattern. This is indicated by the direction of the vertical crack from the tensile area of the beam to the compressive area. Thus the failure model that occurs is a bending failure and no shear failure occurs.

Keywords: Reinforced concrete, fly ash, flexural strength, cracking moment, ductility, bending stiffness

PENDAHULUAN

Balok bertulang adalah elemen struktur fungsional yang mampu menahan lentur dan geser. Distribusi tegangan yang disebabkan beban lentur mengakibatkan serat pada bagian atas balok mengalami tekanan dan serat pada bagian bawah balok mengalami tarikan. Balok akan mengalami keretakan lentur di sepanjang serat tarik balok jika penambahan beban yang terus-menerus karena balok tersebut menahan regangan dan defleksi tambahan. Dan dengan penambahan beban yang melebihi beban yang telah direncanakan sebelumnya, strukturnya bisa runtuh. Oleh karena itu, struktur itu perlu diperkuat untuk memperpanjang umur manfaatnya.

Seiring dengan berkembangnya zaman, telah banyak dilakukan inovasi-inovasi untuk meningkatkan kinerja beton. Salah satunya yakni pemanfaatan abu terbang (*fly ash*) sebagai material tambahan untuk meningkatkan mutu beton. Abu terbang (*fly ash*) diketahui memiliki kandungan yang baik sebagai *pozzolan* untuk bahan tambah campuran beton.

Saat ini penggunaan batu bara di kalangan industri semakin meningkat volumenya, karena harga yang relatif murah dibandingkan harga bahan bakar minyak untuk industri. Penggunaan batu bara sebagai sumber energi pengganti BBM, di satu sisi sangat menguntungkan, namun di sisi lain dapat menimbulkan masalah. Masalah utama dari penggunaan batu bara adalah abu batu bara yang merupakan hasil sampingan pembakaran batu bara. Sejumlah penggunaan batubara akan menghasilkan abu batu bara sekitar 2-10 %. Pada saat ini, pengendalian limbah abu batu bara hanya terbatas pada penimbunan di areal pabrik (*ash disposal*). (Setiawati, 2018).

Abu batu bara merupakan bagian dari sisa pembakaran batu bara yang berbentuk partikel halus amorf. Abu tersebut merupakan bahan anorganik yang terbentuk dari perubahan bahan mineral (*mineral matter*) karena proses pembakaran. Proses pembakaran batu bara pada unit pembangkit uap (*boiler*) akan membentuk dua jenis abu, yaitu abu terbang (*Fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Komposisi abu batu bara terdiri dari 10-20 % abu dasar dan 80-90 % berupa abu terbang. (Setiawati, 2018).

Menurut Lincolen (2017), abu batu bara merupakan limbah dari proses pembakaran batu bara pada pembangkit tenaga uap. Abu batu bara bersifat *pozzolan*, yakni bahan yang mengandung senyawa silika dan aluminium. Pada dasarnya, abu batu bara tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen, namun karena ukurannya yang halus dan adanya air, oksida silika yang terkandung dalam abu batu bara akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi semen, sehingga akan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat.

DASAR TEORI

Kuat Tekan Beton Silinder

Kuat tekan beton merupakan besarnya gaya persatuan luas yang membuat benda uji beton menjadi hancur akibat beban berupa gaya tekan yang dihasilkan oleh mesin CTM (*Compression Testing Machine*). Berdasarkan SNI 03-1974-1990, kuat tekan beton dapat dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Keterangan :

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang (mm²)

Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah perbandingan tegangan normal terhadap tegangan tarik atau tegangan tekan lebih rendah dari batas rasio bahan (SNI 03-2847-2013). Menurut SNI 02-2847-

2013, untuk berat isi beton (W_c) antara 1440 sampai 2560 kg/m^3 modulus elastisitas dapat dihitung dengan rumus:

$$E_c = W_c^{1.5} 0,043 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

Keterangan :

- E_c = Modulus Elastisitas (MPa)
- W_c = Berat Volume Beton (kg/m^3)
- f'_c = Kuat Tekan Beton (MPa)

Analisis Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang

Mengacu pada (Akmaluddin & Suryawan Murtiadi, 2018), dalam menganalisis atau menentukan M_n penampang persegi bertulangan rangkap dapat dilakukan dengan cara membagi penampang tersebut menjadi dua bagian, yaitu:

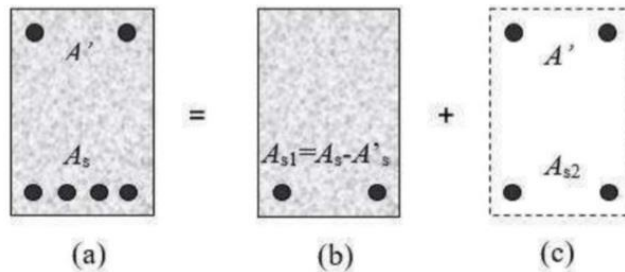
1. Penampang beton persegi bertulangan tunggal (Gambar 1-b) yang memberikan kuat penampang M_{n1} .
2. Penampang dengan luas beton fiktif (imajiner) dengan luas tulangan tekan dan tarik yang sama besar (Gambar 1-c) menghasilkan kuat penampang M_{n2} .

Dengan demikian kapasitas total penampang M_n menjadi:

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (3)$$

atau

$$M_u = \phi M_n = \phi (M_{n1} + M_{n2}) \quad (4)$$



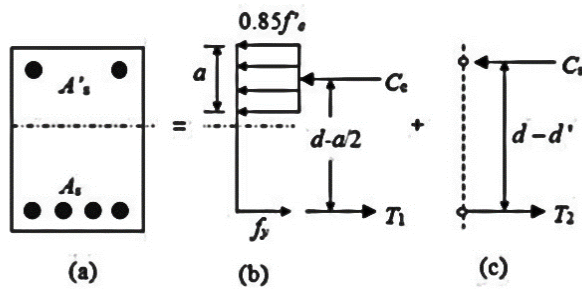
Gambar 1. Idealisasi Penampang Persegi Bertulangan Rangkap
(Sumber: Akmaluddin & Suryawan Murtiadi, 2018)

Penampang pada Gambar 2.3 di atas memiliki gaya-gaya dalam seperti diuraikan pada Gambar 2.4. Diagram gaya dalam penampang pada Gambar 2.3-b dan 2.3-c berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 2.4-b dan 2.4-c. Bila tulangan tarik dan tekan penampang pada gambar di atas dianggap leleh maka gaya-gaya dalamnya menjadi:

$$C_c = 0,85 f'_c a b ; C_s = A'_s f_y ; \quad (5)$$

dan

$$T = T_1 + T_2 = A_s f_y \quad (6)$$



Gambar 2. Gaya-gaya dalam Penampang Bertulangan Rangkap
(Sumber: Akmaluddin & Suryawan Murtiadi, 2018)

Dari keseimbangan gaya dalam horizontal diperoleh $C_c + C_s = T_1 + T_2 = T$ sehingga:

$$0,85 f'_c a b + A'_s f_y = A_s f_y \quad (7)$$

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0,85 f'_c b} \quad (8)$$

momen tahanan nominal penampang menjadi:

$$\begin{aligned} M_n &= C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \\ &= 0,85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \end{aligned} \quad (9)$$

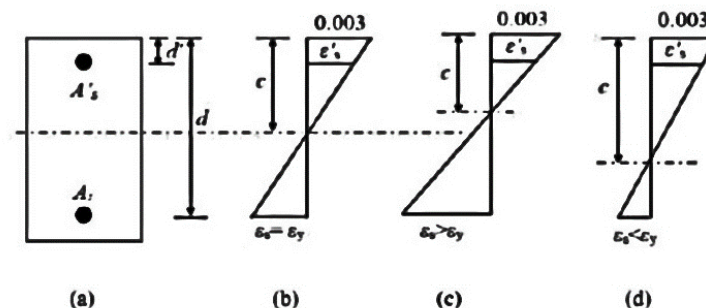
atau

$$\begin{aligned} M_n &= T_1 \left(d - \frac{a}{2} \right) + T_2 (d - d') \\ &= (A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \end{aligned} \quad (10)$$

Bilamana tulangan tarik tidak leleh, tulangan tekan sudah pasti tidak leleh, maka Analisa penampang dihentikan dan disimpulkan penampang bertulangan lebih atau *over reinforced*. Sedangkan bila tulangan tarik leleh, dan tulangan tekan belum mencapai tegangan lelehnya.

Oleh karena itu, diperlukan pengetahuan mengenai batasan-batasan tulangan maksimum penampang bertulangan rangkap dan batasan leleh tidaknya tulangan tarik maupun tulangan tekan.

Di bawah ini akan diuraikan mengenai batasan-batasan tersebut yang diturunkan berdasarkan diagram regangan penampang pada Gambar 2.5 yang menunjukkan diagram regangan pada penampang kondisi seimbang (*balance*) yaitu beton mencapai regangan hancur, $\epsilon'_c = 0,003$, dan baja mencapai regangan lelehnya, $\epsilon_s = \epsilon_y$.



Gambar 3. (a) Penampang Tulangan Rangkap dan Diagram Regangannya; (b) Kondisi Seimbang; (c) Kondisi *under-reinforced* dan (d) Kondisi *over-reinforced*
(Sumber: Akmaluddin & Suryawan Murtiadi, 2018)

Selanjutnya dari perbandingan segitiga diagram regangan *balance* pada Gambar 3 di atas diperoleh:

$$\frac{0,003}{\varepsilon_s} = \frac{c}{d-c} \quad (11)$$

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d-c}{c} \quad .. \quad (12)$$

dan

$$\frac{0,003}{\varepsilon'_s} = \frac{c}{c-d'} \quad (13)$$

$$\varepsilon'_s = 0,003 \frac{c-d'}{c} \quad (14)$$

Bila $a = \beta_1 c$

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{\beta_1 d-a}{a} \quad (15)$$

$$\varepsilon'_s = 0,003 \frac{a-\beta_1 d'}{a} \quad (16)$$

Kondisi kedua tulangan leleh maka: $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$ dan $\varepsilon'_s \geq \varepsilon_y$, sehingga:

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{\beta_1 d-a}{a} \geq \frac{f_y}{E_s} \quad (17)$$

$$\varepsilon'_s = 0,003 \frac{a-\beta_1 d'}{a} \geq \frac{f_y}{E_s} \quad (18)$$

Bila persamaan (17) tidak terpenuhi, regangannya seperti Gambar 3-d berarti tulangan *over-reinforced*, Analisa penampang dihentikan. Bila hanya persamaan (18) yang tidak terpenuhi, maka persamaan (9) atau (10) dapat digunakan dengan mengganti f_y pada komponen tekannya menggunakan tegangan aktualnya, f'_s . Dengan demikian persamaan (9) atau (10) dapat ditulis kembali masing-masing menjadi persamaan (19) dan (20).

$$M_n = 0,85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \quad (19)$$

Atau

$$M_n = (A_s f_y - A'_s f'_s) \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \quad (20)$$

Dengan nilai f'_s dapat diperoleh dari hasil kali E_s dengan regangan tekan baja menurut persamaan (16) seperti berikut ini.

$$f'_s = \varepsilon'_s E_s = 0,003 E_s \left(\frac{a-\beta_1 d'}{a} \right) \quad (21)$$

Nilai E_s untuk baja setara dengan 200.000 MPa, maka persamaan (11) di atas dapat disederhanakan menjadi

$$f'_s = 600 \left(1 - \frac{\beta_1 d'}{a} \right) \quad (22)$$

dan nilai a pada persamaan (12) di atas diperoleh dari keseimbangan gaya dalam Gambar 2, identik seperti persamaan (8), sehingga:

$$a = \frac{A_s f_y - A'_s f'_s}{0,85 f'_c b} \quad (23)$$

Analisis Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang

Pasal 13.1.1 SNI 03-2847-2002 menetapkan bahwa gaya lintang yang bekerja pada penampang yang ditinjau harus direncanakan sedemikian rupa sehingga:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (24)$$

perhitungan gaya geser ultimate didasarkan pada kombinasi antara gaya geser yang diakibatkan oleh beban mati dan gaya geser yang diakibatkan oleh beban hidup dengan hubungan sebagai berikut:

$$V_u = 1,2V_{DL} + 1,6V_{LL} \quad (25)$$

Kuat geser nominal penampang beton dipahami sebagai kombinasi antara kuat geser nominal yang disumbangkan oleh beton V_c dan kuat geser nominal yang disumbangkan oleh tulangan geser V_s dengan hubungan sebagai berikut:

$$V_n = V_c + V_s \quad (26)$$

Pasal 13 SNI 03-2847-2002 mencantumkan batasan-batasan dalam perencanaan kekuatan penampang terhadap geser. Beberapa di antaranya yang berkaitan dengan perencanaan kekuatan penampang terhadap geser yang akan dimodelkan dalam skripsi ini adalah :

- Besarnya V_u boleh direncanakan pada titik sejarak d dari tumpuan
- Besarnya gaya geser sumbangan beton V_c adalah:

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d \quad (27)$$

jika $V_n < 0,5 V_c$ maka tidak diperlukan penulangan geser

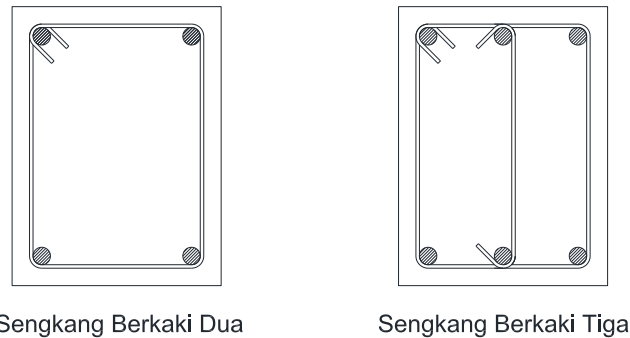
- Jika $0,5 V_c < V_n < V_c$ maka pada penampang diperlukan penulangan geser minimum dengan jarak sengkang s :

$$s = \frac{3A_v v_y}{b_w} \quad (28)$$

dan A_v adalah luas tulangan geser pada penampang yang dirumuskan sebagai :

$$A = n \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \quad (29)$$

Dengan n adalah jumlah kaki sengkang, untuk sengkang berkaki dua maka n=2 dan untuk sengkang berkaki tiga maka n=3.



Gambar 4. Sekema Jumlah Kaki Sengkang

- Jarak antar sengkang minimum : $s_{min} = 100 \text{ mm}$
- Jika $V_n > V_c$ maka diperlukan penulangan geser, di mana gaya geser yang harus ditahan oleh tulangan sesuai dengan persamaan 10 dengan jarak sengkang s:

$$s = \frac{A_v f_y d}{v_s} \quad (30)$$

- Pembatasan jarak sengkang:
 - untuk $V_s \leq \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} b_w d$ maka s_{max} adalah yang terkecil dari $d/2$ atau 600 mm
 - untuk $V_s \leq \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} b_w d < V_s < \frac{2}{3} \sqrt{f'_c} b_w d$ maka s_{max} adalah yang terkecil dari $d/4$ atau 300 mm
 - untuk $V_s > \frac{2}{3} \sqrt{f'_c} b_w d$ diperlukan perubahan penampang beton

Menurut ACI Code 318-14, V_c dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$V_c = (0,16 \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u}) b_w d \quad (31)$$

Momen Retak (M_{cr})

Retak terjadi pada umumnya menunjukkan bahwa lebar celah retak sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada batang tulangan baja tarik dan beton pada ketebalan tertentu yang menyelimuti batang baja tersebut. Meskipun retak tidak dapat dicegah, namun ukurannya dapat dibatasi dengan cara menyebar atau mendistribusikan tulangan. Apabila struktur dibebani suatu beban yang menimbulkan momen lentur masih lebih kecil dari momen retak maka tegangan yang timbul masih lebih kecil dari *modulus of rupture* beton maka :

$$f_r = 0,70 \sqrt{f'_c} \quad (32)$$

Apabila beban ditambah sehingga tegangan tarik mencapai f_r , maka retak kecil akan terjadi. Apabila tegangan tarik sudah lebih besar dari f_r , maka penampang akan retak.

Ada tiga kasus yang dipertimbangkan dalam masalah retak yaitu :

- a. Ketika tegangan tarik $f_t < f_r$, maka penampang dipertimbangkan untuk tidak terjadi retak. Untuk kasus ini maka:

$$I_g = 1/12b.h^3 \quad (33)$$

- b. Ketika tegangan tarik $f_t = f_r$, maka retak mulai timbul. Momen yang timbul disebut momen retak dapat ditulis :

$$M_{cr} = f_r \frac{I_g}{c} \quad (34)$$

Dimana : $c = h/2$

- c. Apabila momen yang bekerja sudah lebih besar dari momen retak, maka retak penampang sudah meluas. Untuk perhitungan digunakan momen inersia retak (I_{cr}), transformasi balok beton yang tertekan dan transformasi dari tulangan n.Ac.

Keterangan :

M_{cr} = Momen crack (Nmm)

f_r = Modulus runtuh beton (N/mm²)

I_g = Inersia gross penampang balok (mm⁴)

c = Jarak garis netral dengan sisi tarik terluar penampang (mm⁴)

Kekakuan Lentur Balok Beton Bertulang

Kekakuan lentur (EI) balok beton bertulang dihitung sebelum terjadinya lendutan plastis akibat beban titik yang berlangsung. Beban tersebut dihasilkan oleh mesin tekan berupa *hydraulic jack*. Kekakuan lentur balok beton bertulang dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$EI = \frac{p_y a}{48 \delta_y} (3L^2 - 4a^2) \quad (35)$$

Keterangan :

EI = Kekakuan lentur balok beton bertulang (Nmm²)

P_y = Beban ketika baja tulangan leleh (N)

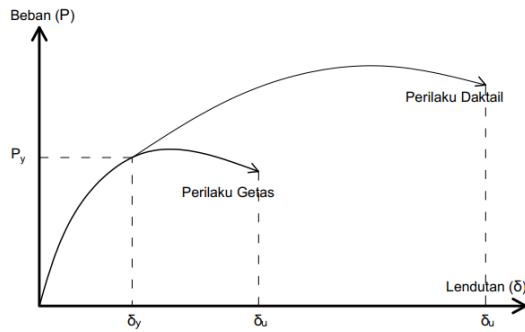
a = Jarak putaran beban ke tumpuan (mm).

δ_y = Defleksi balok ketika tulangan baja leleh (mm)

L = Panjang balok dari tumpuan ke tumpuan (mm)

Daktilitas Balok Beton Bertulang

Berdasarkan Gambar 5 di bawah menunjukkan perbandingan antara perilaku getas beton dengan perilaku daktail ketika menyerap beban yang diterima. Dari gambar tersebut, perilaku getas merupakan kondisi beton sudah mencapai batas elastis sehingga terjadi kehancuran secara langsung. Sedangkan perilaku daktail dapat menyerap energi ketika terjadi keluluhan terhadap tulangan yang diikuti dengan lendutan yang kemudian akan disusul dengan keruntuhan balok.



Gambar 5. Perilaku beban-lendutan pada elemen lentur
(Sumber : Susilorin dan Sambowo, 2010)

Besarnya daktilitas dapat diartikan sebagai perbandingan defleksi balok ketika beban sudah mencapai batas ultimit dengan defleksi balok ketika beban saat baja tulangan leleh. Sehingga, berdasarkan definisi tersebut nilai daktilitas balok dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (36)$$

Keterangan :

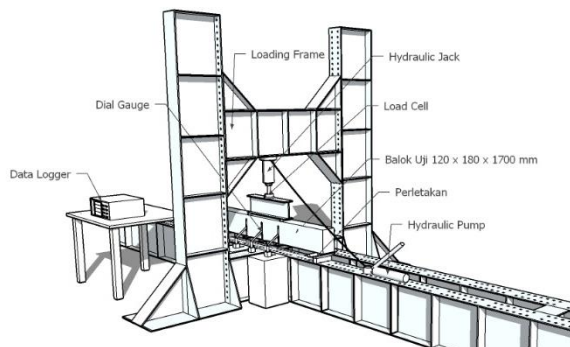
- μ = Daktilitas balok beton bertulang
- δ_u = Defleksi balok ketika beban ultimit (mm)
- δ_y = Defleksi balok ketika baja tulangan pada penampang leleh (mm)

METODE PENELITIAN

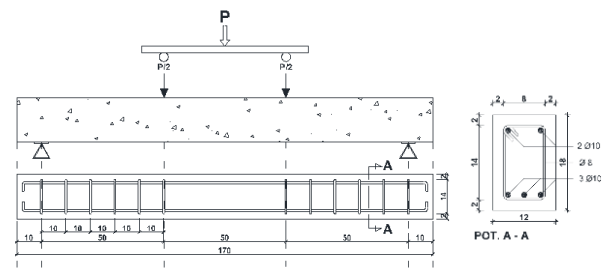
Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui peningkatan kuat tekan serta kapasitas lentur, kapasitas geser, kekakuan, momen retak, daktilitas, dan pola retak pada balok beton bertulang dengan penambahan abu terbang (*fly ash*) sebagai bahan tambah pada beton normal. Dimana variasi campuran dari abu terbang (*fly ash*) adalah 15% terhadap semen. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode eksperimen yang dilakukan di laboratorium dengan maksud mengetahui korelasi antara balok beton bertulang normal dengan balok beton bertulang dengan penambahan abu terbang (*fly ash*). Abu terbang (*fly ash*) yang digunakan pada penelitian ini berasal dari PLTU Jeranjang di Desa Taman Ayu, Gerung, Lombok Barat, Nusa Tenggara Barat.

Pada penelitian ini dibuat benda uji berupa silinder dan balok beton bertulang. Beton silinder dengan ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm dibuat untuk memastikan mutu beton yang direncanakan sebanyak 12 buah,. Sedangkan untuk balok beton bertulang dengan ukuran 120 x 180 x 2000 mm dibuat sebanyak 4 buah, 2 buah untuk pengujian kapasitas lentur dan 2 buah untuk kapasitas geser, dengan mutu beton yang digunakan adalah beton normal 25 MPa.

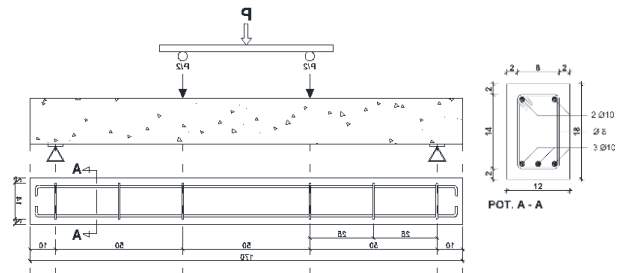
Pengujian kapasitas lentur balok ini menggunakan alat berupa *loading frame* dengan beberapa komponen yang tersusun menjadi satu kesatuan seperti *hydraulic pump*, *load cell*, *hydraulic jack*, *dial gauge*, *data logger* dan alat bantu lainnya seperti yang terlampir pada Gambar.4. Balok akan terus diberi beban secara perlahan dengan interval waktu 5 detik sehingga komputer *data logger* akan mencatat beban dan defleksi yang terjadi setiap interval waktu tersebut sampai batas hancur penampang balok.



Gambar 6. Setting Up alat pengujian pada balok beton bertulang



Gambar 7. Detail Balok Lentur

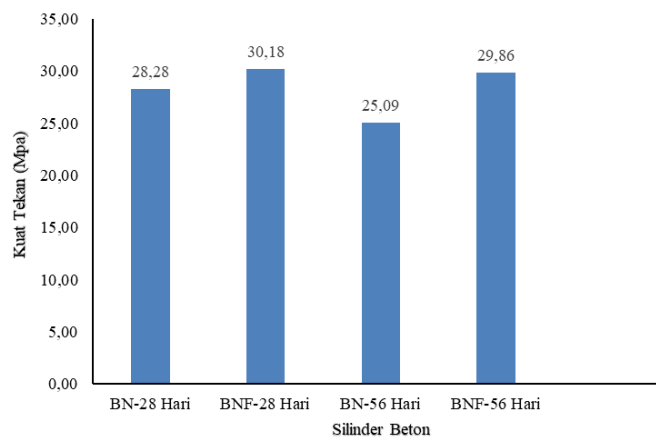


Gambar 8. Detail Balok Geser

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur beton sudah mencapai 28 hari dan 56 hari dengan menggunakan mesin tekan berupa *Compression Testing Machine (CTM)* guna memperoleh beban maksimum yang membuat benda uji tersebut menjadi hancur dikarenakan gaya desak yang dihasilkan oleh mesin CTM.



Gambar 9. Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder 28 Hari

Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa beton dengan penambahan *fly ash* memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton tanpa penambahan *fly ash*. Hal ini serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Suarnita (2011), bahwa penggunaan *fly ash* dapat meningkatkan kuat tekan beton. Hal ini disebabkan penambahan *fly ash* ke dalam semen sebagai bahan tambah tanpa mengurangi proporsi dari semen, maka akan dapat meningkatkan unsur pengikat dalam semen yaitu silika (SiO_2) sehingga kuat tekan dihasilkan akan meningkat. Akan tetapi, kuat tekan beton pada usia 56 hari cenderung lebih kecil dibandingkan dengan beton usia 28 hari. Hal ini, diasumsikan terjadi karena pembuatan benda uji yang 28 dan 56 hari

tidak dilakukan pada hari yang sama, sehingga membuat mutu dari beton tersebut tidak konsisten.

Modulus Elastisitas

Pengujian modulus elastisitas dilakukan secara bersamaan dengan pengujian kuat tekan beton dengan menggunakan *extensometer*. Pengujian modulus elastisitas dilakukan dengan cara mengatur kecepatan beban yang diberikan secara konstan dan dilakukan pembacaan jarum perpendekan setiap 20 div. Pembebanan dilakukan sampai jarum beban tidak bisa naik lagi atau sampai benda uji tidak bisa menerima beban.

Pada penelitian ini diperoleh modulus elastisitas dari penjabaran hubungan tegangan dengan regangan dimana diketahui modulus elastisitas beton adalah tegangan dibagi regangan. Nilai tegangan tersebut diperoleh dari pengujian kuat tekan dari hasil pembebanan. Berikut hasil pengujian modulus elastisitas dianalisis dengan persamaan (2). Hasil pengujian modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Hasil Uji Modulus Elastisitas

No	Kode Benda Uji	Kuat Tekan (Mpa)	Modulus Elastisitas (Mpa) $\frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,00005}$	Modulus Elastisitas (Mpa) $4700\sqrt{f'c}$
1	BN-28 Hari	28,28	13569,53	24994,22
2	BF-28 Hari	30,18	12218,89	25819,42
3	BN-56 Hari	25,09	21840,41	23540,91
4	BF-56 Hari	29,86	17963,29	25682,47

Dari Tabel 1 menunjukkan bahwa kemampuan beton dalam menahan gaya yang bekerja semakin meningkat dengan penambahan *fly ash* pada beton. Nilai modulus elastisitas tertinggi didapat pada beton normal dengan penambahan *fly ash* umur 28 hari sebesar 25836,96 Mpa. Penambahan *fly ash* pada beton berpengaruh terhadap kenaikan nilai modulus elastisitas dari beton itu sendiri. Modulus elastisitas beton yang dihasilkan dalam penelitian ini diperoleh bahwa dengan penambahan *fly ash* pada beton maka nilai modulus elastisitas juga bertambah.

Kapasitas Balok Beton Bertulang

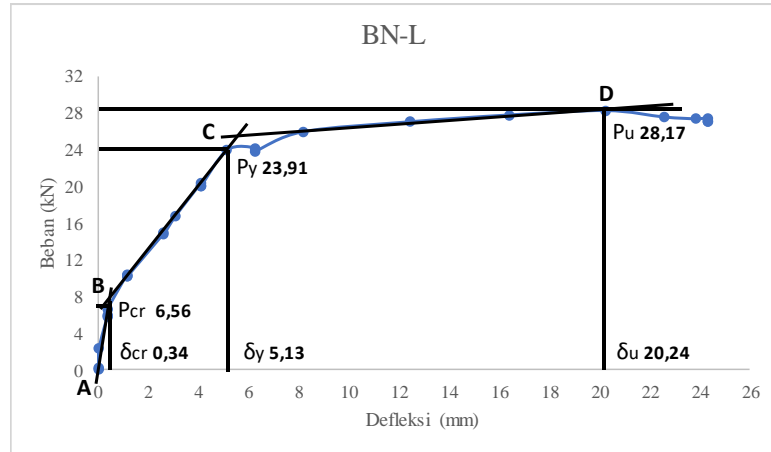
Kapasitas balok beton bertulang normal (CN) dengan kapasitas balok beton bertulang fiber (CF) dengan pemberian dua titik beban simetris menghasilkan kapasitas yang berbeda, dapat dilihat pada Tabel 2. Mulai dari beban yang membuat penampang balok mengalami retakan pertama (P_{cr}), beban ketika baja tulangan leleh (P_y) dan beban ultimit (P_u).

Tabel 2. Kapasitas masing-masing jenis penampang balok

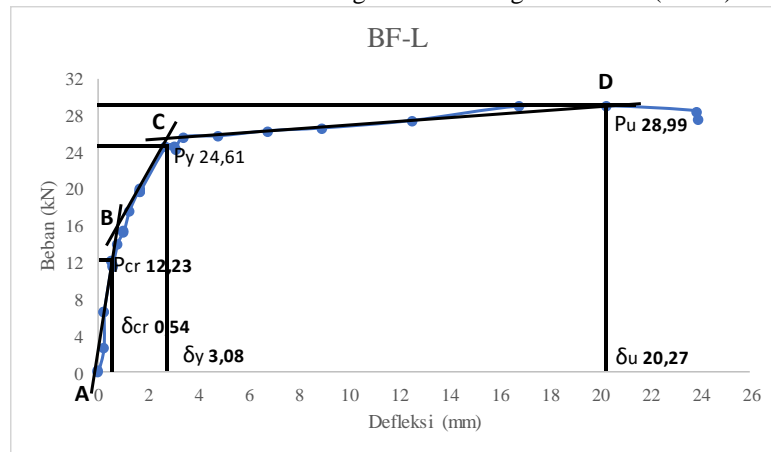
No.	Balok	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)	δ_{cr} (mm)	δ_y (mm)	δ_u (mm)
1	BN-L	6,56	23,91	28,17	0,34	5,13	20,24
2	BF-L	12,23	24,61	28,99	0,54	3,08	20,27
3	BN-G	6,15	18,5	21,57	0,21	1,93	11,39
4	BF-G	10,97	21,02	25,91	1,7	4,65	19,87

Berdasarkan Tabel 2 di atas dapat dijelaskan bahwa beban *crack* (P_{cr}), beban ketika tulangan baja leleh (P_y) dan beban ultimit (P_u) untuk beton dengan penambahan *fly ash* (BF) besarnya selalu diatas beton normal (BN). Menurut penelitian yang pernah dilakukan oleh Akmaluddin (2011) P_{cr} , P_y dan P_u ditentukan dengan mengguakan kurva beban-defleksi yang menghubungkan tiga garis linier yaitu AB, BC dan CD. Dimana garis AB dan BC yang berpotongan ditentukan sebagai beban retak (P_{cr}), sedangkan garis BC dan CD yang berpotongan sebagai beban leleh (P_y) dan titik D sebagai beban ultimit (P_u).

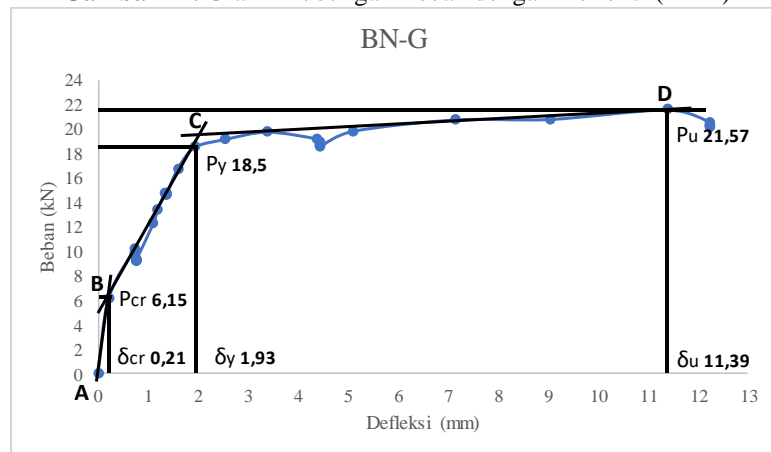
Berikut hubungan beban dengan defleksi yang terjadi pada masing-masing jenis penampang balok:



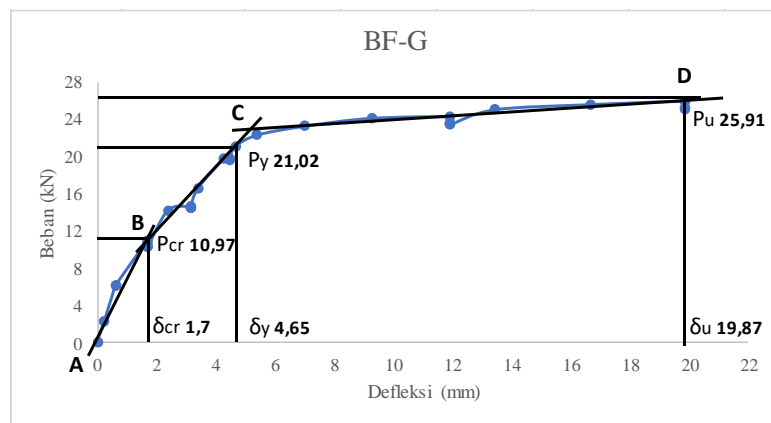
Gambar 10. Grafik Hubungan Beban dengan Defleksi (BN-L)



Gambar 11. Grafik Hubungan Beban dengan Defleksi (BF-L)



Gambar 12. Grafik Hubungan Beban dengan Defleksi (BN-G)



Gambar 13. Grafik Hubungan Beban dengan Defleksi (BF-G)

Kekakuan Lentur

Nilai kekakuan pada balok beton bertulang dapat dilihat pada Tabel 3, kekakuan lentur masing-masing penampang balok tersebut terhitung sebelum terjadinya lendutan plastis akibat beban yang berlangsung. Berdasarkan Persamaan (35) kekakuan lentur untuk masing-masing penampang balok dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kekakuan lentur balok

No	Balok	Py (kN)	δu (mm)	EI (Nmm ²)	Peningkatan
1	BN-L	23,91	20,24	4,72,E+07	2,78%
2	BF-L	24,61	20,27	4,85,E+07	
3	BN-G	18,5	11,39	6,49,E+07	-34,87%
4	BF-G	21,02	19,87	4,23,E+07	

Berdasarkan Tabel 3 dapat dijelaskan bahwa balok lentur *fly ash* (BF-L) mengalami peningkatan sebesar 2,78% bila dibandingkan dengan balok lentur normal (BN-L). Sedangkan balok geser *fly ash* (BF-G) mengalami penurunan sebesar 34,87% dibandingkan dengan balok geser normal (BN-G). Penurunan kekakuan pada balok kemungkinan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain karakteristik bahan, lekatan antar bahan-bahan yang berbeda, dan kondisi pembebanan. Namun demikian, penurunan ini dianggap tidak signifikan.

Momen Retak (M_{cr})

Momen retak merupakan momen yang terjadi pada saat retakan pertama pada penampang balok. Hal ini diakibatkan beban yang diserap oleh penampang balok sudah mencapai modulus runtuh beton (f_r).

Berdasarkan tabel dibawah dapat dijelaskan bahwa rasio hasil analisis untuk momen retaknya (M_{cr}) dengan hasil eksperimen di laboratorium pada masing-masing balok yakni 0,81 untuk balok lentur *normal* (BN); 1,39 untuk balok lentur *fly ash* (BF-L); 0,76 untuk balok geser normal (BN-G) dan 0,69 untuk balok geser *fly ash* (BF-G). Begitupun dengan beban hasil analisis dengan eksperimen yang juga mengikuti rasio dari momen retak (M_{cr}). Sehingga pendekatan hasil teori dengan eksperimen di lapangan memiliki nilai 81% untuk balok lentur *normal* (BN), 139% untuk balok lentur *fly ash* (BF-L), 76% untuk balok geser normal (BN-G) dan 125% balok geser *fly ash* (BF-G).

Tabel 4. Perbandingan momen retak teori dengan momen retak eksperimen

No	Balok	Momen		Rasio	Beban		Rasio
		Mcr teori (kN)	Mcr eks (kN)	(Meks/Mteo)	Pcr teori (kN)	Pcr eks (kN)	(Peks/Pteo)
1	BN-L	8,05	6,56	0,81	2,01	1,64	0,81
2	BF-L	8,78	12,23	1,39	2,20	3,06	1,39
3	BN-G	8,05	6,15	0,76	2,01	1,54	0,76
4	BF-G	8,78	10,97	1,25	2,20	2,74	1,25

Apabila dibandingkan momen retak antara balok *fly ash* dengan balok normal, balok lentur *fly ash* (BF-L) mengalami peningkatan sebesar 86,43% dari balok lentur normal (BN-L) dan pada balok geser *fly ash* (BF-G) mengalami peningkatan sebesar 78,37% dari balok geser normal (BN-G). Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* yang berfungsi sebagai pengisi (*filler*) yang akan menambah internal kohesi dan mengurangi porositas daerah transisi yang merupakan daerah terkecil dalam beton, sehingga beton menjadi lebih kuat, Setiawati (2018).

Daktilitas

Daktilitas suatu balok beton bertulang ditandai dengan kemampuan balok menahan beban layan yang berlangsung walaupun tulangan baja sudah mencapai titik leleh sampai penampang balok hancur. Nilai daktilitas dapat dihitung dengan Persamaan (36) dengan hasil dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai daktilitas masing-masing balok

No	Balok	δy (mm)	δu (mm)	Daktilitas ($\mu = \delta u / \delta y$)	Peningkatan
1	BN-L	5,13	20,24	3,95	66,81%
2	BF-L	3,08	20,27	6,58	
3	BN-G	1,93	11,39	3,36	32,30%
4	BF-G	4,65	19,87	4,45	

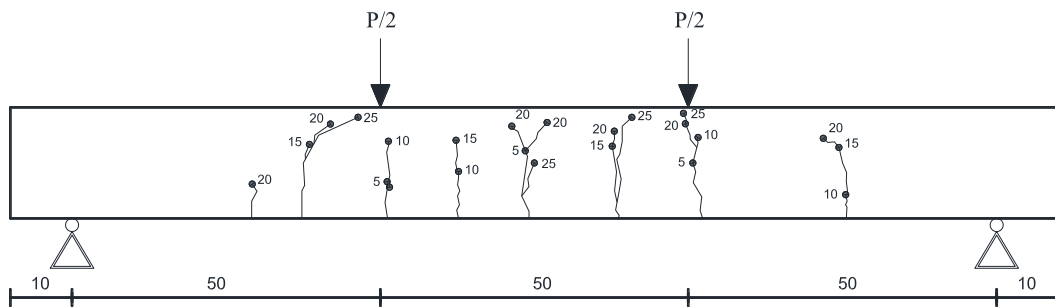
Berdasarkan Tabel 5 dapat dilihat bahwa dengan penambahan *fly ash* ke dalam campuran beton meningkatkan nilai daktilitas pada balok lentur *fly ash* (BF-L) sebesar 66,81% dibandingkan balok lentur normal (BN-L). Sedangkan pada balok geser *fly ash* (BF-G) mengalami peningkatan sebesar 32,20% dibandingkan dengan balok geser normal (BN-G). Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* yang berfungsi sebagai *filler* memiliki kadar bahan semen yang tinggi dan mempunyai sifat pozzolanic yang memungkinkan terjadinya peningkatan kekuatan dan durabilitas dari beton. Kandungan *fly ash* Sebagian besar terdiri dari silikat dioksida (SiO_2), Aluminium (Al_2O_3), besi (Fe_2O_3), dan kalsium (CaO), serta magnesium, potassium, sodium, titanium dan sulfur dalam jumlah yang lebih sedikit. (Antoni, 2007).

Pola Retak

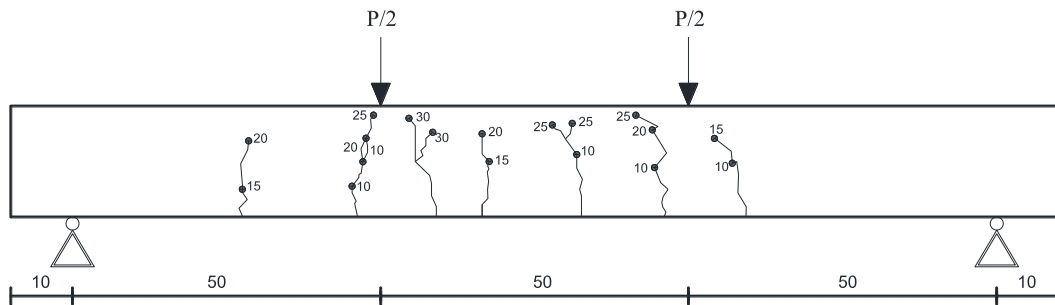
Pembebanan yang dikenakan pada balok diikuti dengan munculnya retak-retak halus pada sisi balok. Retakan halus menunjukkan apakah balok yang diuji tersebut mengalami kegagalan yang diakibatkan oleh kegagalan lentur. Kegagalan lentur biasanya diawali dengan retakan halus di bagian tengah bentang membentuk garis vertikal dan terjadi secara menerus sampai balok beton tersebut tidak lagi mampu menahan beban yang diberikan.

Bila diamati secara cermat retakan yang terjadi pada setiap jenis balok yang diuji pada gambar 14 membentuk pola garis lurus ke atas (vertikal). Keadaan runtuh lentur yang seperti ini menyebabkan beberapa retak halus dengan vertikal terjadi di daerah tengah bentang sekitar 50% dari yang diakibatkan oleh beban runtuh lentur (Nawy, 1990). Sehingga dapat disimpulkan bahwa pengujian balok tersebut terjadi kegagalan lentur.

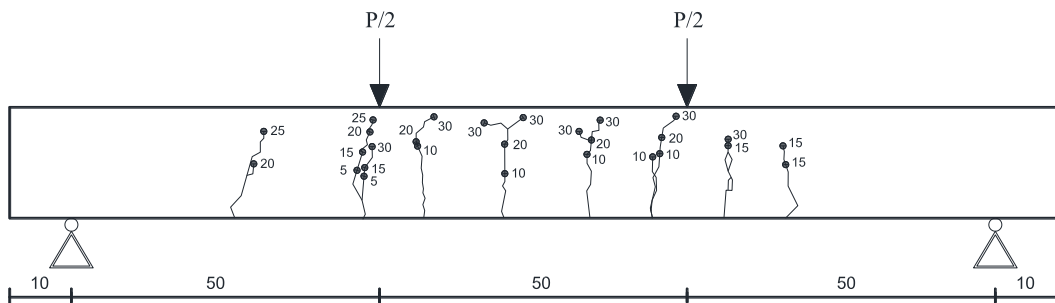
Pola retak untuk masing-masing jenis penampang balok dapat dilihat pada gambar 14 berikut.



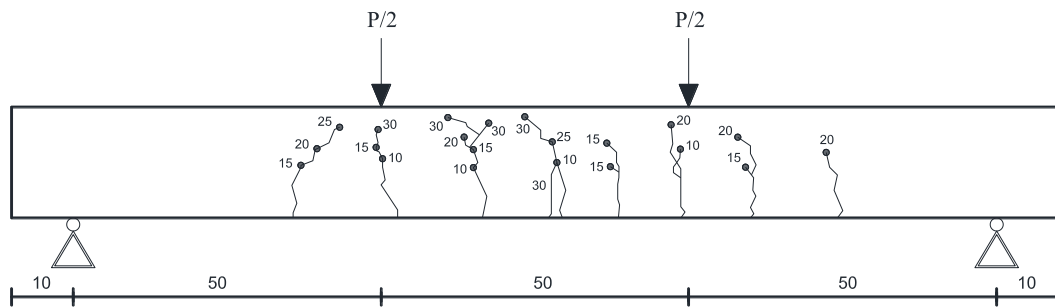
a. Pola Retak Balok Normal-Lentur (BN)



b. Pola Retak Balok Fly Ash-Lentur (BF)



c. Pola Retak Balok Normal-Geser (BN)



d. Pola Retak Balok Fly Ash-Geser (BF)

Gambar 14. Pola retak pada masing-masing penampang balok

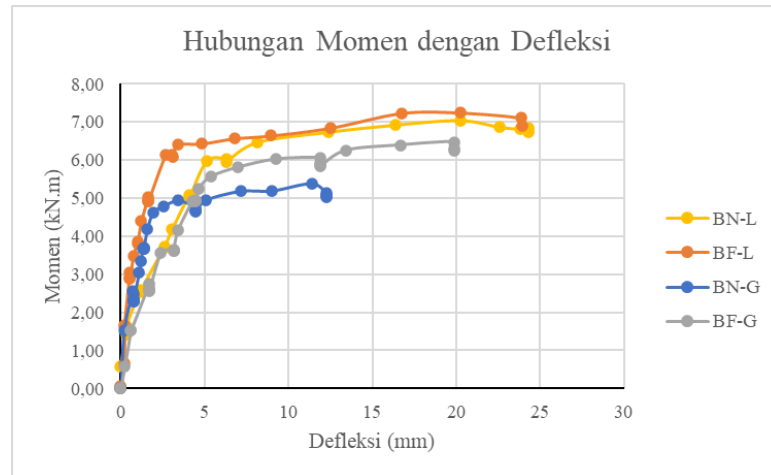
Perbandingan Kapasitas Lentur Teori dan Eksperimen

Dari hasil eksperimen yang dilakukan di laboratorium, sebelumnya sudah dilakukan analisis terlebih dahulu terkait kemampuan atau kapasitas masing-masing penampang balok, baik itu balok normal (BF) maupun balok dengan penambahan *fly ash* (BF). Persamaan yang digunakan yaitu Persamaan (19) untuk penampang balok lentur. Sedangkan untuk penampang balok geser menggunakan Persamaan (26). Hasil perbandingan kapasitas lentur teori dan eksperimen dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan kapasitas lentur teori dan eksperimen

No	Balok	M teori (kN)	M eks (kN)	Rasio (Meks/Mteo)	P eks (kN)	P teori (kN)	Rasio (Peks/Pteo)
1	BN-L	10,41	7,04	0,68	28,17	41,65	0,68
2	BF-L	11,80	7,25	0,61	28,99	47,20	0,61
3	BN-G	10,41	5,39	0,52	21,57	31,77	0,68
4	BF-G	11,80	6,48	0,55	25,91	32,90	0,79

Tabel 6 menjelaskan bahwa, rasio hasil perbandingan antara teori dengan eksperimen untuk balok lentur normal (BN-L) sebesar 68%, balok lentur *fly ash* (BF-L) sebesar 61%, balok geser normal (BN-G) sebesar 52% dan balok geser *fly ash* (BF-G) sebesar 55%, yang berarti hasil teoritis lebih besar dari eksperimen di laboratorium. pada perhitungan secara teoritis diasumsikan kondisi beton dalam keadaan yang proporsional sehingga hasil yang didapatkan dari eksperimen bisa lebih besar atau lebih kecil.



Gambar 15. Hubungan momen dengan defleksi pada masing-masing penampang balok

Dari Gambar tersebut dapat dilihat, garis untuk beton dengan penambahan *fly ash* berada diatas garis beton tanpa penambahan *fly ash*. Hal ini dikarenakan kapasitas beton *fly ash* (BF) lebih besar dari beton normal (BN). Peningkatan kapasitas lentur pada beton *fly ash* (BF) dipengaruhi oleh *fly ash* yang tercampur pada penampang balok memiliki unsur pengikat dalam semen serta kerapatan yang lebih besar sehingga dapat meningkatkan 2,91% kapasitas lentur balok *fly ash* (BF-L) dan 20,12% untuk balok geser *fly ash* (BF-G) dari balok normal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan, dapat diambil beberapa kesimpulan diantaranya sebagai berikut :

1. Kuat tekan beton *fly ash* (BF) memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan beton normal (BN). Nilai kuat tekan beton *fly ash* (BF) dan beton normal (BN) pada 28 hari berturut-turut sebesar 30,18 MPa dan 28,28 Mpa. Sedangkan pada 56 hari sebesar 29,86 MPa dan 25,09 MPa.
2. Balok dengan penambahan *fly ash* mampu meningkatkan kapasitas lentur serta daktilitas berturut-turut sebesar 2,91% dan 66,81% pada balok lentur *fly ash* (BF-L), sedangkan pada balok geser *fly ash* (BF-G) meningkat sebesar 20,12% dan 32,30%.
3. Kekakuan balok lentur *fly ash* (BF-L) mengalami peningkatan sebesar 2,78% dari balok lentur normal (BN-L). Sedangkan balok geser *fly ash* (BF-G) mengalami penurunan sebesar 34,87% dari balok geser normal (BN-G).
4. Untuk momen retak (M_{cr}) pada balok *fly ash* memiliki kapasitas lebih besar bila dibandingkan dengan beton normal. Penambahan *fly ash* mampu meningkatkan kapasitas momen retak (M_{cr}) balok lentur *fly ash* (BF-L) sebesar 86,43% dan pada balok geser (BF-G) sebesar 78,37% dari balok geser normal (BN-G).
5. Penambahan Penambahan *fly ash* pada balok mampu meminimalisir penyebaran retak geser akibat pembebanan sebelumnya dan mencegah munculnya retak geser yang baru sehingga pola retak pada seluruh benda uji menunjukkan pola retak lentur (*flexural crack*). Hal ini ditunjukkan dengan arah retakan vertikal dari daerah tarik balok menuju ke daerah tekan. Dengan demikian model kegagalan yang terjadi adalah kegagalan lentur dan tidak terjadi kegagalan geser.

Saran

1. Untuk agregat halus (pasir) perlu diperhatikan kondisi berat jenisnya dalam keadaan kering permukaan atau *Saturated Surface Dry* (SSD). Karena kondisi berat jenis ini akan mempengaruhi volume penggunaan agregat halus sebagai penyusun beton.
2. Ketika melakukan pemadatan dengan vibrator pada beton, usahakan dilakukan dengan durasi yang cukup lama agar beton dapat memadat secara sempurna, dan untuk menghindari terjadinya cacat beton antara tulangan, penggunaan vibrator harus dilakukan dengan tepat.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut dengan menambahkan faktor-faktor yang berpengaruh lainnya, sehingga dapat menghasilkan mutu beton yang lebih baik dari segi kekuatan juga dari segi lentur dan geser.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 318-14. 2014. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute.
- Adibroto, F., Suhelmidawati, E., dan Zade, A.A.M. 2018. *Eksperimen Beton Mutu Tinggi Berbahan Fly Ash sebagai Pengganti Sebagian Semen*. *Jurnal Polytechnic State of Padang*, Vol. XV, No. 1, April 2018.
- Aji, G. D., Setiya, B. A., & Saifullah, H. A. (2019). *Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang HFVA Memadat Senidri Terhadap Beton Normal dengan Kadar Fly Ash 50%*. Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret.
- Akmaluddin & Murtiadi, S. 2018. *Struktur Balok Beton (Bagian 1 Struktur Balok Bertulang)*. Mataram: Mataram University Press
- Akmaluddin (2011). Effect of Tensile Reinforcement Ratio on the Effective Moment of Inertia of Reinforced Lightweight Concrete Beams for Short Term Deflection Calculation. *LPPM ITB*, ISSN: 1978-3051, DOI: 10.5614/itbj.eng.sci.2011.43.3.4
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1972-2008 Cara Uji Slump Beton. *Badan Standar Nasional*, 5.
- Badan Standardisasi Nasional. 2002. *SNI 03-2847-2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2002. *SNI-03-6863-2002 Metode Pengambilan Contoh dan Pengujian Abu Terbang atau Pozolan Alam sebagai Mineral Pencampur dalam Beton Semen Portland*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2004. *SNI 15-2049-2004 Semen Portland*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2011. *SNI 03-1974-2011 Cara Uji Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2011. *SNI 4431-2011 Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal Dengan Dua Titik Pembebanan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2012. *SNI 7656-2012 Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

- Badan Standardisasi Nasional. 2013. *SNI 03-2847-2013 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Dipohusodo, I. (1994). *Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03*. Jakarta: Gramedia.
- Lukito, I.C., 2011. *Studi Perilaku Kuat Geser Pada Beton dengan Menggunakan Serat Kawat Bendrat*. Skripsi. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Mujibullah, & Suhaimi. (2020). *Variasi Penambahan Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Beton*. Prodi Teknik Sipil Universitas Almuslim, Matangglumpangdua, Bireuen.
- Nawy, E. G. 2002. Concrete structures: stresses and deformations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(4), 633.
- P. Nugraha, dan Antoni (2007). *Teknologi Beton, Dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi*. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Prasetyo, A., Budi, A. S., & Kristiawan, S. A. (2019). *Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang HVFA Memadat Sendiri dengan Kadar Fly Ash 60% Terhadap Beton Normal*. Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret.
- Setiawati, M. (2018). *Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen pada Beton*. Prodi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Palembang.
- Sumajouw, M.D.J., dan Dapas, S.O. 2013. *Elemen Struktur Beton Bertulang Geopolymer*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Tjokrodimuljo, K. (2007). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Biro Penerbit Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada.