

**PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BETON BERTULANG  
SANDWICH DENGAN INTI BETON RINGAN BERBAHAN *FLY*  
*ASH***

*FLEXURAL AND SHEAR BEHAVIOR OF SANDWICH REINFORCED CONCRETE  
BEAM WITH LIGHTWEIGHT CONCRETE CORE MADE FROM FLY ASH*

Artikel Ilmiah

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



Oleh:

**MUHAMMAD GLENDY CAHYA NINGTYAS**

**F1A017104**

**JURUSAN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MATARAM**

**2024**

Artikel Ilmiah

**PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BETON BERTULANG  
SANDWICH DENGAN INTI BETON RINGAN BERBAHAN FLY  
ASH**

Telah diperiksa dan disetujui oleh Tim Pembimbing:


1. Pembimbing Utama



Prof. Akmaluddin, ST., M.Sc(Eng)., Ph.D  
NIP. 196812311994121001

Tanggal:

2. Pembimbing Pendamping



Pahlurahman, ST., MT.  
NIP. 196612311994031018

Tanggal:

Mengetahui  
Ketua Jurusan Teknik Sipil  
Fakultas Teknik  
Universitas Mataram



Harisadi, S.T., M.Sc(Eng)., Dr. Eng.  
NIP: 197310271998021001

Artikel Ilmiah

**PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BETON BERTULANG  
SANDWICH DENGAN INTI BETON RINGAN BERBAHAN FLY  
ASH**

Oleh:  
**Muhammad Glendy Cahya Ningtyas**  
F1A 017 104

Telah diujikan di depan Tim Penguji  
Pada tanggal 22 Januari 2024  
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat mencapai derajat Sarjana S-1  
Jurusan Teknik Sipil

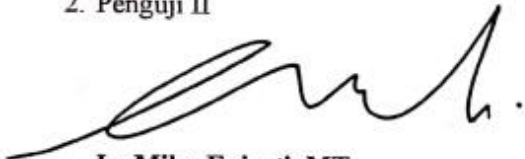
**Susunan Tim Penguji**

1. Penguji I

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

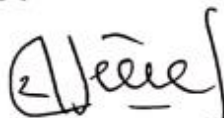
Tanggal:

2. Penguji II

  
**Ir. Miko Eniarti, MT.**  
NIP. 19650315 199103 2 001

Tanggal:


3. Penguji III

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

Tanggal:

Mataram, 22 Januari 2024  
Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Mataram



  
**Ir. Muhammad Syamsu Iqbal, ST., MT., Ph.D.**  
NIP. 19720222 199903 1 002

**PERILAKU LENTUR DAN GESER BALOK BETON BERTULANG  
SANDWICH DENGAN INTI BETON RINGAN BERBAHAN FLY ASH**  
*FLEXURAL AND SHEAR BEHAVIOR OF SANDWICH REINFORCED CONCRETE  
BEAM WITH LIGHTWEIGHT CONCRETE CORE MADE FROM FLY ASH*

**Muhammad Glendy Cahya N.<sup>1</sup>, Akmaluddin<sup>2</sup>, Pathurahman<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Mataram

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Mataram

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

Email: muhammadglendy8@gmail.com

---

## INTISARI

Perencanaan konstruksi dalam suatu gelagar diharapkan cukup kuat untuk menahan gaya-gaya yang mungkin timbul akibat beban yang diperhitungkan, baik berupa gaya memanjang maupun gaya melintang. Balok adalah struktur yang fleksibel, dengan karakteristik yang sangat kompleks karena menerima banyak gaya, sehingga mudah pecah. Penelitian ini bertujuan untuk melihat perilaku lentur dan geser pada balok sandwich beton dengan abu terbang (*fly ash*) batubara. Pengujian kapasitas lentur dan geser 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. Hasil penelitian menunjukkan bahwa abu terbang (*fly ash*) mempengaruhi perilaku lentur dan geser dari balok beton bertulang *sandwich*. Dilihat pada beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur mengalami peningkatan pada kekakuan dan daktilitas sebesar 42% dan 4%, sedangkan beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser kekakuan dan daktilitas sebesar 25% dan 94%. Hal ini membuktikan dengan penambahan abu terbang (*fly ash*) mampu meningkatkan kapasitas lentur dan geser beton *sandwich*.

**Kata Kunci** : Beton *sandwich*, *fly ash*, kuat lentur, kuat geser.

## **ABSTRACT**

The construction planning for a beam aims to ensure sufficient strength to withstand the forces that may arise due to the calculated loads, both in terms of longitudinal and transverse forces. Beams are flexible structures with highly complex characteristics as they experience various forces, making them susceptible to failure. This research focuses on investigating the flexural and shear behavior of concrete sandwich beams incorporating coal fly ash. The flexural and shear capacity of these beams was tested using a loading frame equipped with components such as a hydraulic pump, load cell, hydraulic jack, dial gauge, data logger, and other auxiliary tools. The results of the study indicate that fly ash significantly influences the flexural and shear behavior of reinforced concrete sandwich beams. In the case of fly ash concrete sandwich beams (BSFA), there was an increase in flexural stiffness and ductility by 42% and 4%, respectively. For shear behavior, the addition of fly ash resulted in a 25% increase in stiffness and a substantial 94% improvement in ductility for fly ash concrete sandwich beams (BSFA). This demonstrates that the incorporation of fly ash enhances both the flexural and shear capacities of concrete sandwich beams.

**Keywords** : Sandwich concrete, fly ash, flexural strength, shear strength.

## PENDAHULUAN

Perencanaan konstruksi dalam suatu gelagar diharapkan cukup kuat untuk menahan gaya-gaya yang mungkin timbul akibat beban yang diperhitungkan, baik berupa gaya memanjang maupun gaya melintang. Balok adalah struktur yang fleksibel, dengan karakteristik yang sangat kompleks karena menerima banyak gaya, sehingga mudah pecah. Salah satu dari struktur yang umum digunakan dalam konstruksi bangunan adalah beton bertulang. Konstruksi balok beton bertulang dimaksudkan agar balok tersebut mempunyai kekuatan lentur dan kekakuan untuk dapat memikul beban dan gaya-gaya yang bekerja pada struktur suatu bangunan. Seorang teknik sipil tentunya mengharapkan pembangunan gedung direncanakan sesuai dengan harapan terutama dari segi keselamatan konstruksi, sehingga sebelum melanjutkan pekerjaan konstruksi apapun pada gedung harus dilakukan analisis struktur dengan benar dan berpedoman pada peraturan SNI -03-2847 -2002 dan SNI-2847-2013 tentang perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung.

Pada penelitian ini subjek yang digunakan adalah beton, material yang dominan dalam pembangunan dan perbaikan infrastruktur teknik sipil. Di antara berbagai teori mengenai analisis elemen struktur beton, dapat diketahui bahwa bagian elemen struktur beton yang memiliki kinerja optimal dalam menahan gaya lentur hanya bagian luarnya saja. Itu bahkan di bagian yang mengalami tekan, sedangkan beton dalam keadaan tarik, kekuatannya diabaikan dan diganti dengan tulangan. Oleh karena itu, tidak akan efektif jika inti beton terbuat dari beton yang sama untuk kinerja optimal. Melihat tidak efektifnya ini, lahirlah ide untuk membuat terdiri dari sejumlah lapisan beton yang berbeda, yang disebut *sandwich* beton. Dengan *sandwich* beton ini, desain elemen structural beton dapat dibuat secara efektif menggunakan beton memiliki daya tahan tinggi di lapisan terluar (kulit) sedangkan di tengah (inti) diisi beton dengan kekuatan rendah tetapi sangat ringan.

Benda uji ini akan dibuat balok dengan dua lapisan yang berbeda (beton *sandwich*). Pada bagian tekan pada penampang balok digunakan beton normal dan bagian tarik pada penampang balok digunakan beton ringan dengan mutu yang lebih rendah. Penggunaan beton ringan pada balok dimaksudkan agar berat keseluruhan balok lebih ringan, apalagi penempatan beton ringan di serat bawah balok tidak mengurangi kekuatan lentur balok. Namun penggunaan ringan juga perlu memperhatikan pengaruh gaya geser pada balok. Diketahui bagian beton yang menahan gaya geser itu sebagai fungsi dari mutu beton, tinggi, dan lebar penampang. Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan agar penggunaan beton ringan pada balok dapat bekerja secara optimal dalam menahan gaya geser dan momen lentur akibat beban layan yang bekerja.

Untuk mencapai balok *sandwich* beton dengan mutu yang sesuai tambahan bahan dan kualitas material bisa mempengaruhi mutu beton yang akan dicapai, maka perlunya percobaan pemanfaatan material alam yaitu limbah hasil limbah batu bara dengan memanfaatkan abu terbang (*fly ash*) yang mempunyai kadar bahan semen yang tinggi dan sifat pozzolanik sehingga dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan mutu dari balok beton *sandwich*.

## DASAR TEORI

### Kuat Tekan Beton Silinder

Kuat tekan beton adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan persatuan luas beton hingga beton tersebut hancur. Kekuatan tekan merupakan salah satu kinerja utama beton.

Menurut SNI 03-1974-2011 kuat tekan beban beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan. Tegangan tekan maksimum ( $f'c$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut:

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

Keterangan :

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

$P$  = Beban maksimum (N)

$A$  = Luas penampang ( $\text{mm}^2$ )

### Modulus Elastisitas Beton

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

Modulus elastisitas suatu bahan mencerminkan kemampuan bahan untuk menahan gaya. Oleh karena itu modulus elastisitas beton merupakan fungsi dari kuat tekan beton. Modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh jenis agregat, kelembaban sampel beton, faktor air semen, umur beton dan temperatur. Secara umum, kuat tekan beton meningkat seiring dengan meningkatnya modulus elastisitasnya.

ASTM C469 (2010) memberikan rumus yang digunakan untuk menghitung modulus elastisitas beton secara eksperimen sebagai berikut:

$$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (2)$$

Dengan:

$Ec$  = Nilai Modulus Elastisitas (MPa)

$S_1$  = Tegangan pada saat Regangan 0,00005 (MPa)

$S_2$  = Tegangan pada saat 40% dari Beban Maksimum (MPa)

$\varepsilon_2$  = Regangan pada saat  $S_2$

$$Ec = 4700 \sqrt{f'c} \quad (\text{untuk beton normal}) \quad (3)$$

Dengan:

$Ec$  = Modulus Elastisitas (MPa)

$Wc$  = Berat Volume Beton ( $\text{kg/m}^3$ )

$f'c$  = 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  $M_{n1}$ .

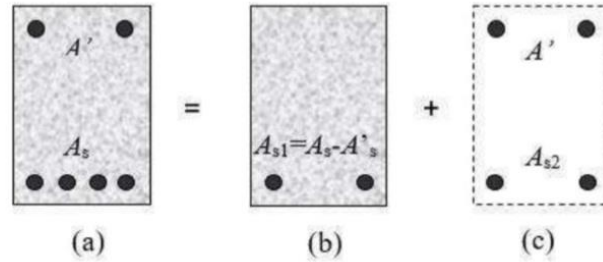
2. Penampang dengan luas beton fiktif (imajiner) dengan luas tulangan tekan dan garik yang sama besar (Gambar 1-c) menghasilkan kuat penampang  $M_{n2}$ .

Dengan demikian kapasitas total penampang  $M_n$  menjadi:

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

atau

$$M_u = \phi M_n = \phi(M_{n1} + M_{n2}) \quad (5)$$



**Gambar 1** Idealisasi Penampang Persegi Bertulangan Rangkap

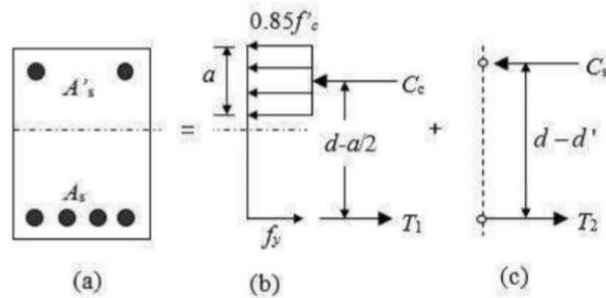
(Sumber: Akmaluddin & Suryawan Murtiadi, 2018)

Penampang pada Gambar 1 di atas memiliki gaya-gaya dalam seperti diuraikan pada Gambar 2. Diagram gaya dalam penampang pada Gambar 1-b dan 1-c berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 2-b dan 2-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:



$$M_n = C_c \left( d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d')$$

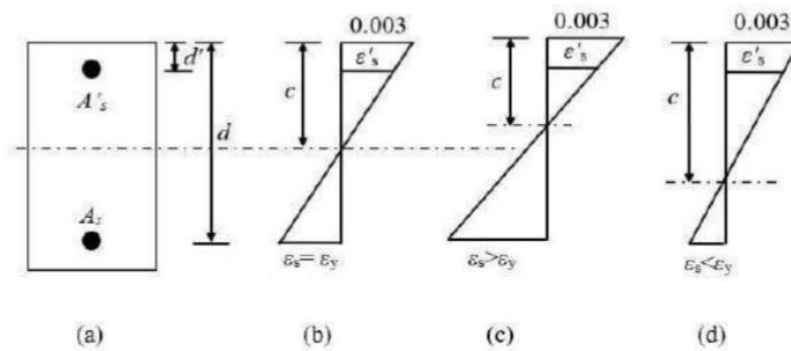
$$= 0,85 f'_c a b \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d')$$
(9)

atau

$$M_n = T_1 \left( d - \frac{a}{2} \right) + T_2 (d - d')$$

$$= (A_s - A'_s) f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d')$$
(10)

Di bawah ini akan diuraikan mengenai batasan-batasan tersebut yang diturunkan berdasarkan diagram regangan penampang pada Gambar 2 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 2 di atas diperoleh:

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

$$\epsilon_s = 0,003 \frac{d-c}{c}$$
(12)

dan

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

$$\epsilon'_s = 0,003 \frac{c-d'}{c}$$
(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:

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

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

Dengan demikian persamaan (8) atau (9) dapat ditulis kembali masing-masing menjadi persamaan (18) dan (19).

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

Atau

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

Nilai  $E_s$  untuk baja setara dengan 200.000 MPa, maka persamaan dapat disederhanakan menjadi

$$f'_s = 600 \left( 1 - \frac{\beta_1 d'}{a} \right) \quad (21)$$

dan nilai  $a$  pada persamaan (7) di atas diperoleh dari keseimbangan gaya dalam Gambar 2, identic seperti persamaan (21), sehingga:

$$a = \frac{A_s f_y - A'_s f'_s}{0,85 f'_c b} \quad (22)$$

### Analisis Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang

Gaya geser rencana ( $V_e$ ) untuk menentukan keperluan tulangan geser kolom harus ditentukan dari kuat momen maksimum  $M_{pr}$  dari setiap ujung komponen struktur yang bertemu di hubungan balok-kolom yang bersangkutan. Gaya geser rencana ( $V_e$ ) tersebut tidak perlu melebihi yang ditentukan dari kekuatan joint berdasarkan pada  $M_{pr}$  komponen struktur transversal yang merangka ke dalam joint. Pada gaya geser rencana berdasarkan kuat momen balok yang merangka pada hubungan balok kolom tersebut, namun tidak boleh lebih kecil dari gaya geser terfaktor berdasarkan analisis struktur. Perencanaan penampang terhadap geser harus memenuhi persamaan seperti berikut ini.

$$\phi V_n \geq V_u \quad (23)$$

$V_u$  adalah gaya geser terfaktor dan  $V_n$  adalah kuat geser nominal yang dihitung dari persamaan berikut.

$$V_n = V_c + V_s \quad (24)$$

dengan :

$V_c$  = kuat geser yang disumbangkan oleh beton

Kuat geser disumbang oleh beton untuk komponen struktur yang dibebani gaya tekan aksial sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 11.2.1.2. ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g}\right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (25)$$

dan

$$V_s = A_v f_y d s \quad (26)$$

dengan :

$A_v$  = luas tulangan geser,

$V_s$  = kuat geser nominal yang disumbangkan oleh tulangan geser,

$A_g$  = luas bruto penampang kolom,

$N_u$  = beban aksial terfaktor yang terjadi,

$b_w$  = lebar balok,

$f_y$  = tegangan leleh yang baja,

$f'_c$  = kuat tekan beton yang disyaratkan,

Batasan spasi maksimum tulangan geser ditentukan dengan SNI 2847:2019, pasal 18.7 :

1. Spasi tulangan geser yang dipasang tegak lurus terhadap sumbu komponen struktur tidak boleh melebihi  $d/2$  pada komponen struktur non prategang dan  $0,75 h$  pada komponen struktur prategang, ataupun 600 mm,

2. Senggang miring dan tulangan longitudinal yang dibengkokkan harus dipasang dengan spasi sedemikian hingga setiap garis 45 derajat, menerus ke arah reaksi dari tengah tinggi komponen struktur  $d/2$  ke tulangan Tarik longitudinal, harus disilang oleh paling sedikit satu garis tulangan geser,

3. Bila  $V_s$  melebihi  $0,33 \sqrt{f'_c} b_w d$  maka spasi maksimum seperti yang terdapat pada point 1 dan 2 harus dikurangi setengahnya,

Menurut SNI 2847:2019 pasal 21.3.4.2, Senggang perama harus dipasang tidak boleh melebihi dari 50 mm dari muka tumpuan. Jarak maksimum antara Senggang tertutup tidak boleh melebihi :

(a)  $d/4$

(b) delapan kali diameter terkecil tulangan memanjang,

(c) 24 kali diameter batang tulangan Senggang tertutup, dan

(d) 300 mm.

Senggang harus dispasikan tidak lebih dari  $d/2$  sepanjang panjang balok. Spasi

senggang :

$$s = \frac{A_v}{f_y \cdot d \cdot V_s} \quad (27)$$

Keterangan :

$V_c$  = kekuatan geser minimal beton

$V_s$  = kekuatan geser nominal angkur

$s$  = spasi antar Senggang

$A_v$  = luas tulangan geser

$f_y$  = kekuatan leleh tulangan

$D$  = jarak dari serat terjauh ke pusat tulangan

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

$$V_c = \left(0,16 \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u}\right) b_w d \quad (28)$$

### Momen Retak ( $M_{cr}$ )

Momen retak merupakan momen yang terjadi ketika retakan pertama pada penampang balok. Momen ini terjadi ketika tegangan tarik ( $f_t$ ) sudah mencapai modulus runtuh beton ( $f_r$ ). Besarnya momen retak ini dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$M_{cr} = f_r \frac{I_g}{c} \quad (29)$$

Keterangan :

$M_{cr}$  = Momen crack (Nmm)

$f_r$  = Modulus runtuh beton (N/mm<sup>2</sup>)

$I_g$  = Inersia gross penampang balok (mm<sup>4</sup>)

$c$  = Jarak garis netral dengan sisi tarik terluar penampang (mm<sup>4</sup>)

Ketika tegangan tarik  $f_t < f_r$ , maka penampang dipertimbangkan untuk tidak terjadi retak.

Untuk kasus ini maka:

$$I_g = 1/12b.h^3 \quad (30)$$

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 :

$$f_r = 0,70\sqrt{f'_c} \quad (31)$$

Keterangan :

$f_r$  = Modulus runtuh beton (MPa)

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

$b$  = Lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm)

$h$  = Lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)

### **Kekakuan Lentur Balok Beton Bertulang**

Kekakuan lentur (EI) balok beton bertulang terhitung 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 :

$$EI = \frac{p_y a}{48 \delta_y} (3L^2 - 4a^2) \quad (32)$$

Keterangan :

EI = Kekakuan lentur balok beton bertulang (Nmm<sup>2</sup>)

$P_y$  = Beban ketika baja tulangan leleh (N)

$a$  = Jarak putaran beban ke tumpuan (mm).

$\delta_y$  = Defleksi balok ketika tulangan baja leleh (mm)

$L$  = Panjang balok dari tumpuan ke tumpuan (mm)

### **Daktilitas Balok Beton Bertulang**

Daktilitas menyatakan suatu kemampuan dari struktur untuk mengalami lendutan yang besar tanpa mengalami penurunan kekuatan yang berarti. Dalam penelitian ini besarnya nilai daktilitas berdasarkan perbandingan antara lendutan maksimum dengan lendutan leleh pertama. Berdasarkan definisi tersebut nilai daktilitas balok dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (33)$$

Keterangan :

$\mu$  = Daktilitas balok beton bertulang

$\delta_u$  = Defleksi balok ketika beban ultimit (mm)

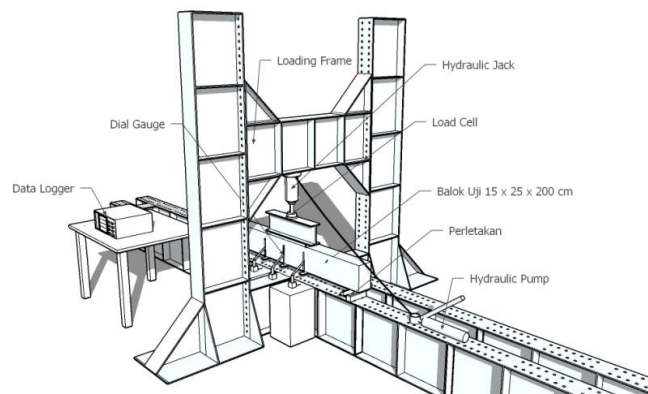
$\delta_y$  = Defleksi balok ketika baja tulangan pada penampang leleh (mm)

## METODE PENELITIAN

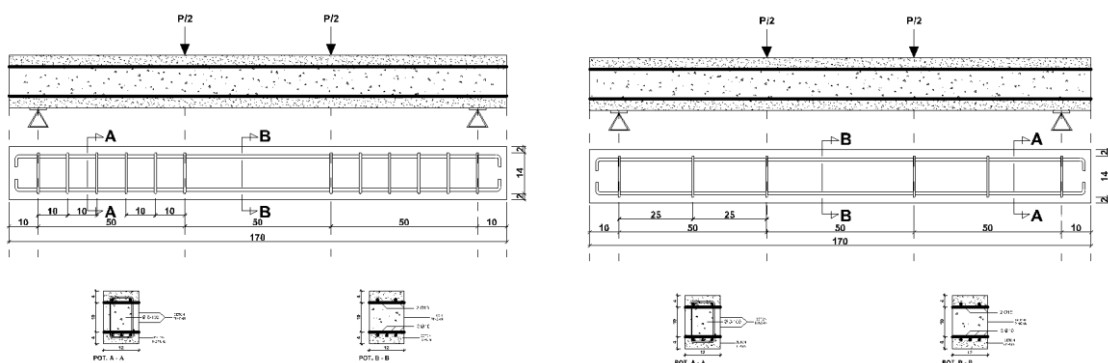
Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui peningkatan kuat tekan dan kapasitas lentur serta geser, kekakuan, momen retak, daktilitas, dan pola retak pada balok beton bertulang yang ditambah dengan *fly ash*. Dimana balok beton *sandwich* dengan kulit beton normal dan inti beton ringan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode eksperimen yang dilakukan di laboratorium dengan maksud mengetahui korelasi antara balok beton *sandwich* dengan balok beton *sandwich fly ash* yang ditambah dengan *fly ash*. Abu terbang (*fly ash*) pada penelitian ini menggunakan abu terbang (*fly ash*) tipe C sebesar 15%.

Pada penelitian ini dibuat benda uji berupa silinder dan balok beton. Beton silinder dengan ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm dibuat untuk memastikan mutu beton yang direncanakan sebanyak 24 buah. Sedangkan untuk balok beton *sandwich* dengan ukuran 120 x 180 x 1700 mm dibuat sebanyak 4 buah dengan mutu beton yang digunakan adalah beton normal 25 MPa dan beton ringan 15 MPa.

Pengujian kapasitas lentur dan geser 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 sehingga komputer *data logger* akan mencatat beban dan defleksi yang terjadi setiap interval tersebut sampai batas hancur penampang balok.



Gambar.4 Alat pengujian balok



Gambar.5 Detail penampang balok

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kuat Tekan

## A. Beton Normal

Tabel.1 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder

Beton	Sampel	Luas Penampang	Benda Uji (kg)	Beban (KN)	Kuat Tekan (Mpa)	Kuat Tekan Rata-rata	Peningkatan (%)
BN-28 Hari	I	17678.6	11.5	520	29.41	27.71	5.17
	II	17915.1	11.6	500	27.91		
	III	17443.6	11.2	480	27.52		
BNF-28 Hari	I	17678.6	11.4	570	32.24	29.15	
	II	17443.6	11.2	530	30.38		
	III	17915.1	11.6	500	27.91		
BN-56 Hari	I	17915.1	11.6	410	22.89	26.19	18.49
	II	17443.6	11.2	440	25.22		
	III	17678.6	11.4	480	27.15		
BNF-56 Hari	I	17443.6	11.2	480	27.52	31.03	
	II	17443.6	11.3	530	30.38		
	III	17678.6	11.5	560	31.68		

Dari Tabel 1 Dari Tabel 4.8 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 ( $\text{SiO}_2$ ) sehingga kuat tekan dihasilkan akan meningkat. Akan tetapi, kuat tekan beton pada usia 56 beton normal (BN) 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.

## B. Beton Ringan

Tabel.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder

Beton	Sampel	Luas Penampang	Berat Benda Uji (kg)	Beban (KN)	Kuat Tekan (Mpa)	Kuat Tekan Rata-rata	Peningkatan (%)
BR-28 Hari	I	17443.6	8.1	285	16.34	15.94	3.43
	II	17678.6	8	280	15.84		
	III	17915.1	8	280	15.63		
BRFA-28 Hari	I	17443.6	8	290	16.62	16.48	
	II	17915.1	8.2	285	15.91		
	III	17443.6	8.2	295	16.91		
BR-56 Hari	I	17678.6	8.1	300	16.97	17.52	8.64
	II	17443.6	8.3	325	18.63		
	III	17678.6	8	300	16.97		
BRFA-56 Hari	I	17443.6	8.1	320	18.34	19.04	
	II	17678.6	8.2	340	19.23		
	III	17915.1	8.1	350	19.54		

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa beton dengan penambahan *fly ash* memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton tanpa penambahan *fly ash*. 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 ( $\text{SiO}_2$ ) sehingga kuat tekan dihasilkan akan meningkat.

Dengan hasil pengujian kuat tekan rata-rata beton ringan *fly ash* (BRFA) umur 28 hari dan 56 hari masuk ke dalam mutu yang direncanakan sebesar 15 Mpa yaitu 16.48 Mpa dan 19.04 Mpa. Kuat tekan rata-rata beton ringan *fly ash* (BRFA) umur 28 hari mengalami peningkatan sebesar 3.43% dari beton ringan (BR) umur 28 hari. Kuat tekan rata-rata beton ringan *fly ash*

(BRFA) umur 56 hari mengalami peningkatan sebesar 8.64% dari beton ringan (BR) umur 56 hari.

### Modulus Elastisitas Beton

Tabel.3 Hasil Pengujian Modulus Elastisitas

No	Kode Benda Uji	Kuat Tekan (Mpa)	Modulus Elastisitas (Mpa) $\frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,00005}$	Modulus Elastisitas (Mpa) Beton Normal $4700\sqrt{f'c}$	Modulus Elastisitas (Mpa) Beton Ringan $W_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'c}$
1	BN-28 Hari	27.71	13569.53	24742.42	-
2	BNFA-28 Hari	29.15	12218.89	25375.65	-
3	BN-56 Hari	26.19	21840.41	24052.80	-
4	BNFA-56 Hari	31.03	17963.29	26181.15	-
5	BR-28 Hari	15.94	5387.65	-	10123.51
6	BRFA-28 Hari	16.48	5430.77	-	10573.02
7	BR-56 Hari	17.52	5445.60	-	10899.71
8	BRFA-56 Hari	19.04	5730.48	-	11269.64

Dari Tabel 3 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* (BNFA) umur 56 hari sebesar 26181,15 Mpa. Dan untuk beton ringan *fly ash* (BRFA) nilai modulus elastisitas tertinggi pada umur 56 hari yaitu 11269,64 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 elastisitasnya juga bertambah.

### Kapasitas Balok Beton Bertulang

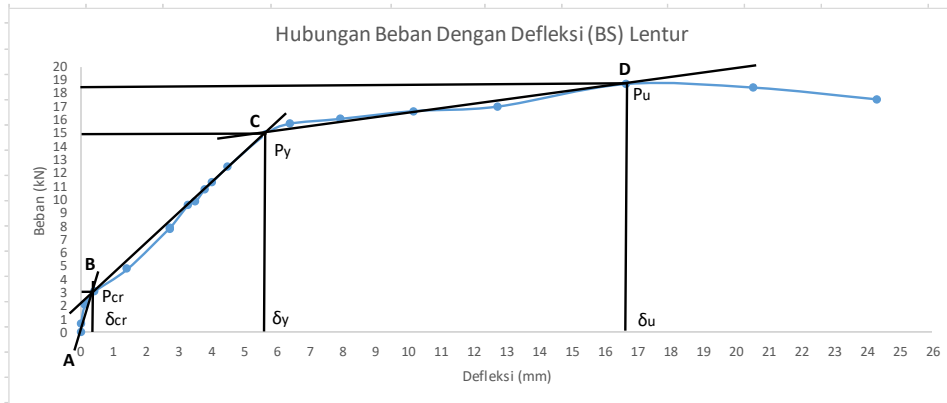
Berdasarkan tabel di atas dapat dijelaskan bahwa beban *crack* ( $P_{cr}$ ), beban ketika tulangan baja leleh ( $P_y$ ) dan beban ultimit ( $P_u$ ) untuk beton *sandwich fly ash* (BSFA) besarnya selalu diatas beton *sandwich* (BS). Hal ini dikarenakan pada beton *sandwich fly ash* (BSFA) ada tambahan perkuatan dengan bahan tambah abu terbang (*fly ash*). Karena *fly ash* mempunyai sifat sebagai filler pada campuran beton *sandwich*.

Tabel.4 Kapasitas Masing-Masing Jenis Penampang Balok

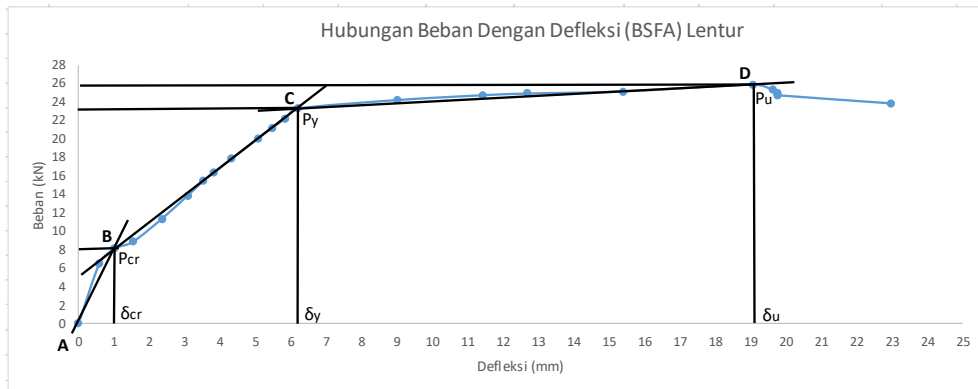
Jenis Beton <i>Sandwich</i>		$P_{cr}$ (kN)	$\delta_{cr}$ (mm)	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)
Lentur	Non <i>Fly Ash</i>	3.08	0.41	14.94	5.65	18.72	16.65
	<i>Fly Ash</i>	8.08	1.02	23.24	6.20	25.84	19.09
Geser	Non <i>Fly Ash</i>	5.20	0.55	16.79	3.97	19.02	6.22
	<i>Fly Ash</i>	5.74	0.71	17.02	4.98	19.72	15.16

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 ( $P_u$ ).

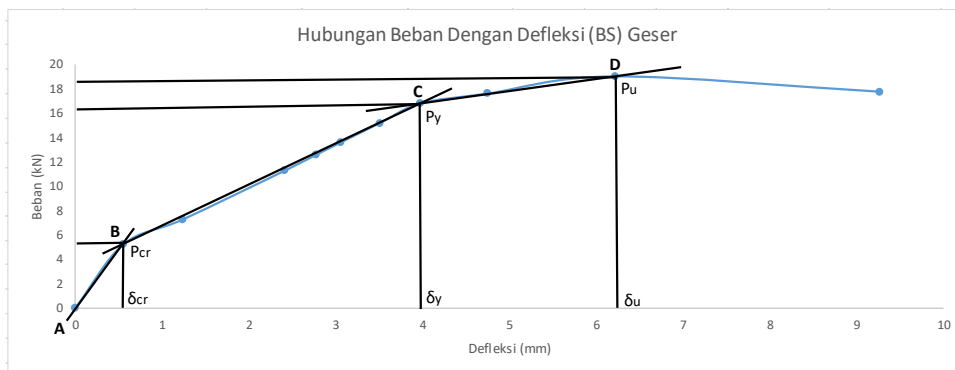
Berikut hubungan beban dengan defleksi yang terjadi pada masing-masing penampang balok :



Gambar.6 Grafik hubungan beban dengan defleksi (BS) Lentur

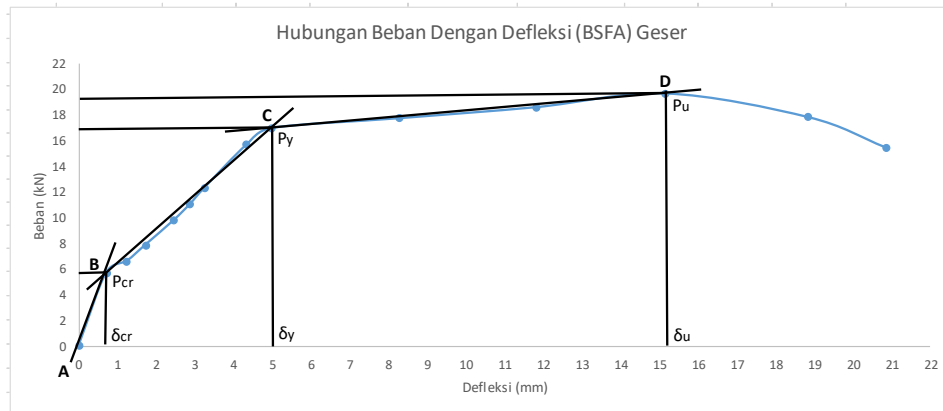


Gambar.7 Grafik hubungan beban dengan defleksi (BSFA) Lentur



Gambar.8 Grafik hubungan beban dengan defleksi (BS) Geser





Gambar.9 Grafik hubungan beban dengan defleksi (BSFA) Geser

Dari hasil pengujian tersebut balok beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur dengan penambahan *fly ash* yang diuji pada umur 56 hari memiliki nilai beban maksimum dan lendutan maksimum yang lebih besar dibandingkan balok beton *sandwich* (BS). Dengan nilai 25,84 kN untuk beban maksimum dan 19,09 mm untuk lendutan maksimum balok beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur, serta 18,72 kN untuk beban maksimum dan 16,65 mm untuk lendutan maksimum balok beton *sandwich* (BS) lentur. Sedangkan untuk balok beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser adalah sebesar 19,72 kN untuk beban maksimum dan 15,16 mm untuk lendutan maksimum, serta 19,02 kN untuk beban maksimum dan 6,22 mm untuk lendutan maksimum balok beton *sandwich* (BS) geser.

### Kekakuan Lentur

Nilai kekakuan pada balok beton *sandwich* dapat dilihat pada Tabel 2, kekakuan lentur masing-masing penampang balok tersebut terhitung sebelum terjadinya lendutan plastis akibat beban yang berlangsung. Berdasarkan Persamaan 31 kekakuan lentur untuk masing-masing penampang balok dapat dilihat pada Table 2.

Tabel.5 Kekakuan lentur

Jensi Beton <i>Sandwich</i>		Py (N)	δy (mm)	EI (Nmm <sup>2</sup> )	Peningkatan
Lentur	Non <i>Fly Ash</i>	14940	5.65	1.06.E+11	42%
	<i>Fly Ash</i>	23240	6.20	1.50.E+11	
Geser	Non <i>Fly Ash</i>	16790	3.97	1.92.E+11	25%
	<i>Fly Ash</i>	17020	4.98	1.55.E+11	

Berdasarkan Tabel 5 dapat dijelaskan bahwa beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur dan geser berturut-turut mengalami peningkatan bila dibandingkan dengan beton *sandwich* (BS) sebesar 42% dan 25%. Peningkatan ini dikarenakan pada beton *sandwich fly ash* (BSFA) terdapat tambahan abu terbang (*fly ash*) yang dimana abu terbang itu sendiri memiliki berfungsi sebagai filler sehingga akan meningkatkan kekakuan pada beton.

### 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 hasil pengujian modulus runtuh beton ( $f_r$ ), dengan menggunakan perhitungan dari persamann 30.

Dengan menggunakan Persamaan 28 hasil analisis momen retak ( $M_{cr}$ ) pada masing-masing penampang balok dapat dilihat pada Tabel 6. Tabel tersebut membandingkan hasil teori dengan eksperimen di laboratorium. Berdasarkan tabel dibawah dapat dijelaskan bahwa rasio hasil analisis untuk momen retaknya ( $M_{cr}$ ) dengan hasil eksperimen di laboratorium yakni 0.38 untuk beton *sandwich* (BS) lentur dan beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur yakni 0.92. Sedangkan untuk beton *sandwich* (BS) geser yakni 0.65 dan beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser yakni 0.65. 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 38% untuk beton *sandwich* (BS) lentur; 92% untuk beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur; 65% untuk beton *sandwich* (BS) geser dan 65% beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser.

Apabila dibandingkan momen retak antara beton *sandwich* (BS) dengan beton *sandwich fly ash* (BSFA), beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur mengalami peningkatan sebesar 162% dari beton *sandwich* (BS) lentur dan pada beton *sandwich fly ash* (BSFA) mengalami peningkatan sebesar 10% dari beton *sandwich* (BS) geser. 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).

Tabel.6 Perbandingan beban dan momen retak teori dengan eksperimen

Jenis Beton <i>Sandwich</i>		Momen		Rasio	Beban		Rasio
		$M_{cr\ teo}$ (kNm)	$M_{cr\ eks}$ (kNm)	Meks/Mteo	$P_{cr\ teo}$ (kN)	$P_{cr\ eks}$ (kN)	Peks/Pteo
Lentur	Non <i>Fly Ash</i>	2.27	0.77	0.34	9.072	3.08	0.34
	<i>Fly Ash</i>	2.53	2.02	0.80	10.1088	8.08	0.80
Geser	Non <i>Fly Ash</i>	2.27	1.3	0.57	9.072	5.2	0.57
	<i>Fly Ash</i>	2.53	1.435	0.57	10.1088	5.74	0.57

### 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 32 dengan hasil dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel.7 Nilai daktilitas masing-masing balok

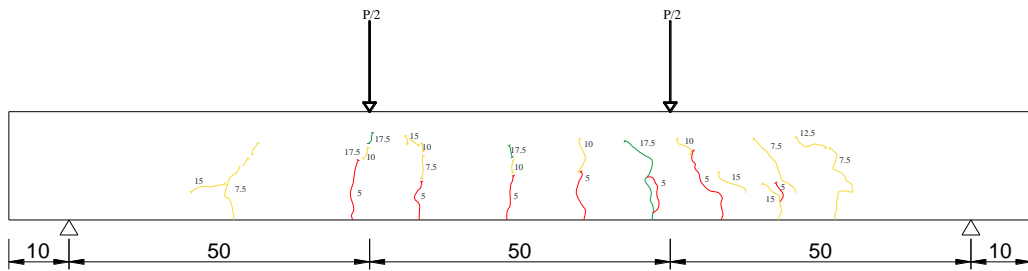
Jenis Beton <i>Sandwich</i>		$\delta y$ (mm)	$\delta u$ (mm)	Daktilitas ( $\mu = \delta u / \delta y$ )	Peningkatan
Lentur	Non <i>Fly Ash</i>	5.65	16.65	2.947	4%
	<i>Fly Ash</i>	6.20	19.09	3.079	
Geser	Non <i>Fly Ash</i>	3.97	6.22	1.567	94%
	<i>Fly Ash</i>	4.98	15.16	3.044	

Berdasarkan Tabel 7 dapat dilihat bahwa dengan penambahan abu terbang (*fly ash*) beton dapat meningkatkan nilai daktilitas pada beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur sebesar 4% dibandingkan beton *sandwich* (BS) lentur. Sedangkan pada beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser *fly ash* mengalami peningkatan sebesar 94% dibandingkan dengan beton *sandwich* (BS) geser. 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).

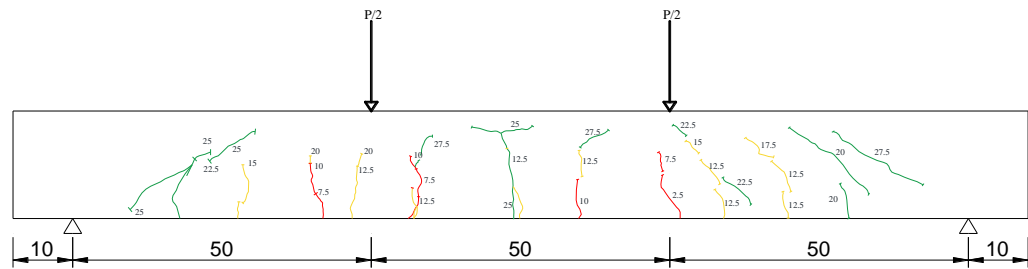
### Pola Retak

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 atau kegagalan geser biasanya diawali dengan retakan halus di bagian tengah bentang membentuk garis vertikal yang terjadi secara menerus sampai balok beton tersebut tidak lagi mampu menahan beban yang diberikan. Sedangkan kegagalan geser diawali dengan retakan halus di bagian tumpuan membentuk garis diagonal yang terjadi secara terus menerus sampai balok beton tersebut tidak lagi mampu menahan beban yang diberikan.

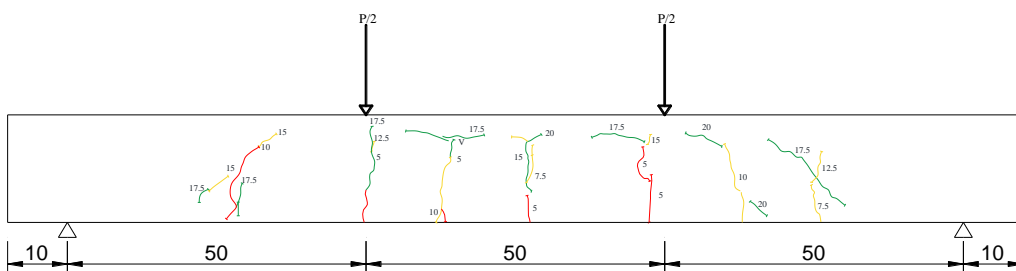
Pola retak untuk masing-masing jenis penampang balok dapat dilihat pada Gambar 10.



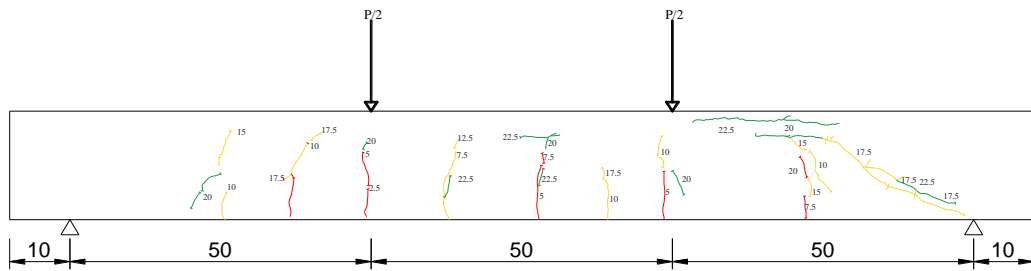
a. Pola retak balok beton *sandwich* (BS) lentur



b. Pola retak balok beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur



c. Pola retak balok beton *sandwich* (BS) geser



d. Pola retak balok beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser

Gambar.10 Pola retak pada masing-masing jenis balok

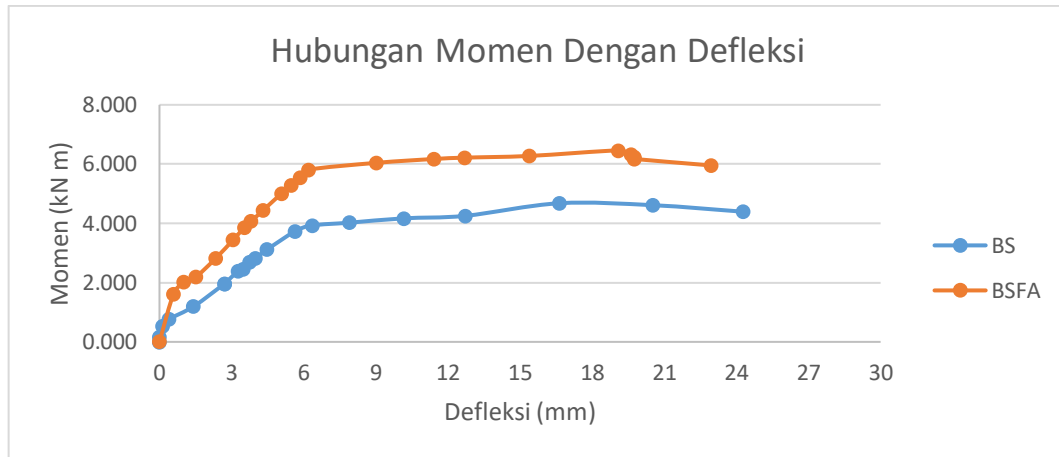
### Perbandingan Kapasitas Lentur, Geser, Teori dan Eksperimen

Dari hasil eksperimen yang dilakukan di laboratorium, sebelumnya sudah dilakukan analisis terlebih dahulu terkait kemampuan atau kapasitas masing-masing penampang balok, baik itu beton *sandwich* (BS) maupun beton *sandwich fly ash* (BSFA). Hasil perbandingan kapasitas lentur dan geser secara teori dan eksperimen dapat dilihat pada Tabel 5.

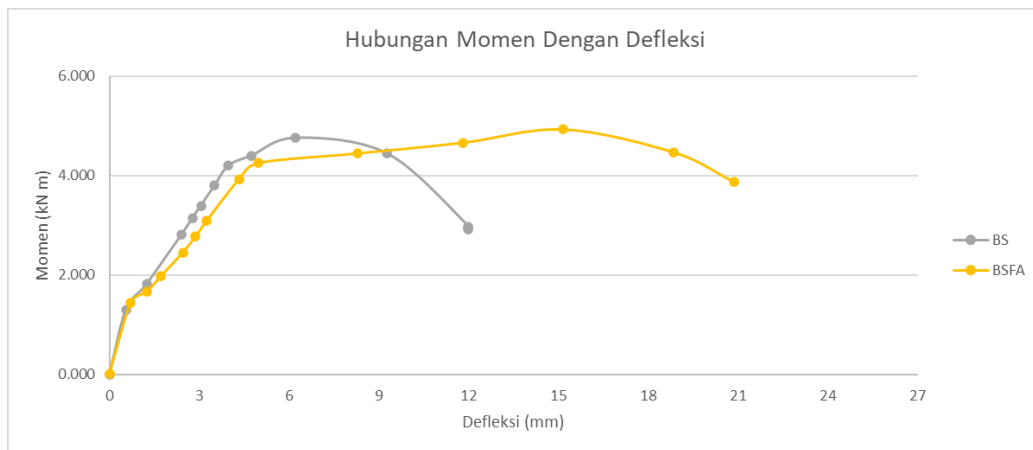
Tabel.5 Perbandingan Kapasitas Lentur, Geser, Teori Dan Eksperimen

Jenis Beton <i>Sandwich</i>		M teori	M eks	Rasio	P teori	P eks	Rasio
		(kN)	(kN)	(Meks/Mteo)	(kN)	(kN)	(Peks/Pteo)
Lentur	Non <i>Fly Ash</i>	9.33	4.68	0.50	37.32	18.72	0.50
	<i>Fly Ash</i>	10.20	6.46	0.63	40.81	25.84	0.63
Geser	Non <i>Fly Ash</i>	9.33	4.76	0.51	30.81	19.02	0.62
	<i>Fly Ash</i>	10.20	4.93	0.48	31.59	19.72	0.62

Tabel 5 menjelaskan bahwa, rasio hasil perbandingan antara teori dengan eksperimen untuk beton beton *sandwich* (BS) dan beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur maupun geser. Pada beton *sandwich* (BS) lentur sebesar 51%; beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur sebesar 64%; beton *sandwich* (BS) geser sebesar 52% dan beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser sebesar 49%, 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.11 Hubungan Momen Dengan Defleksi (Lentur)



Gambar.12 Hubungan Momen Dengan Defleksi (Geser)

Dari Gambar 11 dan Gambar 12 tersebut dapat dilihat, garis untuk beton *sandwich fly ash* (BSFA) berada diatas garis beton *sandwich* (BS). Hal ini dikarenakan kapasitas beton *sandwich fly ash* (BSFA) lebih besar dari beton *sandwich* (BS). Peningkatan kapasitas lentur dan geser pada beton *sandwich fly ash* (BSFA) ini dikarenakan keberadaan abu terbang (*fly ash*) sehingga ada penambahan kekuatan pada penampang beton *sandwich fly ash* (BSFA) yang dapat meningkatkan 38% kapasitas lentur dan 4% untuk beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser dari beton *sandwich* (BS).

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

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

1. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan pada silinder menunjukkan bahwa dengan penambahan abu terbang (*fly ash*) ke dalam campuran beton akan mempengaruhi kekuatan beton itu sendiri. Untuk kuat tekan beton normal yang ditambah abu terbang (*fly ash*) mengalami kenaikan dari beton normal tanpa *fly ash* sebesar 18.49%. Sedangkan untuk kuat tekan beton ringan yang ditambah abu terbang (*fly ash*) mengalami kenaikan dari beton ringan tanpa *fly ash* sebesar 9.62%
2. Kekakuan beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur mengalami peningkatan sebesar 42% dari beton *sandwich* (BS) lentur. Sedangkan beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser mengalami peningkatan sebesar 25% dari beton *sandwich* (BS) geser. Hal ini berbanding lurus dengan meningkatnya nilai daktilitas yang dipengaruhi oleh penambahan *fly ash* yaitu sebesar 4% dan 94% untuk beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur dan geser.
3. Balok dengan penambahan *fly ash* mampu mempengaruhi peningkatan kapasitas lentur dan geser, dimana nilai beton *sandwich fly ash* (BSFA) lentur meningkat sebesar 38%. Sedangkan beton *sandwich fly ash* (BSFA) geser meningkat sebesar 4% (BS). Hal ini sesuai dengan tujuan dari penelitian dimana *fly ash* meningkatkan kuat tekan dan lentur balok beton bertulang *sandwich*.
4. Pada beton *sandwich fly ash* (BSFA) kapasitas lentur dan geser baloknya meningkat dari beton *sandwich* (BS) lentur dan geser, hal ini dipengaruhi oleh tambahan *fly ash* yang berfungsi sebagai filler mampu meningkatkan nilai daktilitas pada beton. Dilihat dari penyebaran retak lentur akibat pembebanan mengalami kegagalan lentur dilihat dari arah retakan secara vertikal. Dan untuk retak geser akibat pembebanan mengalami kegagalan geser dilihat dari arah retakan yang berbentuk diagonal.

### Saran

1. Khusus untuk beton *sandwich* (BS), perlu diperhatikan cara penambahan abu terbang (*fly ash*) ke dalam campuran beton sehingga tidak terjadi penggumpalan serat. Penambahan abu terbang (*fly ash*) dilakukan secara bertahap sedikit demi sedikit agar abu terbang (*fly ash*) dan campuran beton merata dengan baik.
2. Untuk agregat kasar (batu apung) dan 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.
3. Khusus beton *sandwich* antara kulit dengan inti diberikan perekat agar beton yang dijadikan campuran bisa menempel dengan baik dan kekuatan yang didapatkan juga maksimal (sesuai perencanaan).

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, H. (2022). *Analisa Kuat Lentur Balok Sandwich*. Clapeyron: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 3(1). 25-34.
- 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.
- Akmaluddin & Murtiadi, S. 2018. *Struktur Balok Beton (Bagian 1 Struktur Balok Bertulang)*. Mataram: Mataram University Press
- Aldino, Y., & Herbudiman, B. 2017. *Kajian Eksperimental Perilaku Lentur dan Geser Balok Sandwich Beton*. Reka Racana, 20(10). 1-11.
- Aryono, I., Budi, A. S., & Saifullah, H. A. 2020. *Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang HVFA Memadat Sendiri Dengan Kadar Fly Ash 50% Terhadap Beton Normal*. Matriks Teknik Sipil, 8(1).
- ASTM C469. 2010. *Standart Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*.
- Ativah, D., & Herlina, L. 2022. *Perilaku Kuat Geser Pada Beton Dengan Penambahan Remahan Karet Dan Fly Ash*. In Prosiding Seminar Intelektual Muda, 3(2). 327-331.
- Badan Standardisasi Nasional. 2002. *SNI 03-3449-2002 Tata Cara Perancangan Campuran Beton Ringan dengan Agregat Ringan*. 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. 2019. *SNI 03-2847-2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Callister, W. D. 1997. *Materials Science and Engineering – An Introduction*. New York: Wiley.
- Corden, J. 1990. *Honeycomb Structure, in Engineered Materials Handbook*. ASTM Int. 721-728.
- Djiwanto, H. 2001. *Abu Terbang Solusi Pencemaran Semen*. Jakarta: Sinar Harapan.
- Irianti, L. 2009. *Tinjauan Kuat Geser Dan Kuat Lentur Balok Beton Abu Ketel Mutu Tinggi Dengan Tambahan Accelerator*. Rekayasa: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung, 13(2), 167-174.
- Kusumawati, L. 2010. *Prilaku Lentur Balok Beton Sandwich Tanpa Dan Dengan Tulangan Geser Pada Bagian Inti (CORE)*. (Doctoral dissertation, Universitas Mataram).
- Nawy, E. G. 2002. *Concrete Structures: Stresses And Deformations*. Canadian Journal of Civil Engineering, 29(4), 633.
- Nugraha, P., & Antoni. 2007. *Teknologi Beton*. Yogyakarta. Andi Offset.

- Nurfaizi, E., Budi, A. S., & Kristiawan, S. A. 2019. *Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang High Volume Fly Ash (Hvfa) Memadat Sebdiri Dengan Kadar Fly Ash 60% Terhadap Beton Normal*. Matriks Teknik Sipil, 7(4).
- Oehlers D.J., & Bradford M.A. 1995. *Composite Steel and Concrete Structural Members – Fundamental Behaviour*, Pergamon.
- 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. 2003. *Teknologi Bahan Konstruksi*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Tjokrodimuljo, K., 2007. *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Biro Penerbit Keluarga
- Van Straaln, I. J. (1998), *Comprehensive Overview of Theories for Sandwich Panels*, TNO Building and Construction Research, The Netherlands