

## Studi Eksperimental Kekakuan Balok Beton Bertulang Rangkap dengan Agregat Normal *Stiffness Experiment of Double Reinforced Concrete Beams with Normal Aggregate*

Ajeng Tegar Afrilia<sup>1</sup>, Adhitya Surya Manggala<sup>2</sup>, Muhtar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember  
Email : [ajengtegaraf@gmail.com](mailto:ajengtegaraf@gmail.com)

<sup>2</sup>Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember  
Email : [adhityasm@unmuhjember.ac.id](mailto:adhityasm@unmuhjember.ac.id)

<sup>3</sup>Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember  
Email : [muhtar@unmuhjember.ac.id](mailto:muhtar@unmuhjember.ac.id)

### Abstrak

Kekakuan balok ( $EI$ ) merupakan salah satu parameter utama ketahanan struktur terhadap deformasi lentur. Perhitungan parameter kekakuan balok dengan metode defleksi harus memperhatikan kapasitas dan daktilitas balok konstruksi. Elemen struktur dengan daktilitas besar dapat menyerap energi lebih banyak daripada elemen struktur dengan daktilitas kecil begitu juga dengan distribusi kekakuan vertikal yang tidak baik dapat mengakibatkan kerusakan sampai keruntuhan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekakuan, kapasitas, dan daktilitas pada balok beton bertulang rangkap. Balok yang diuji berukuran 75 mm x 150 mm x 1100 mm dengan variasi mutu beton yaitu K-300, K-350, dan K-400. Metode pengujian menggunakan *three-point method* yang cara pengujiannya menggunakan 2 tumpuan dan 1 penekan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan peningkatan kekakuan cenderung linear dengan peningkatan mutu beton. Kekakuan yang harus diperhatikan adalah dari mutu beton karena bertambahnya mutu beton yang digunakan memberikan pengaruh terhadap kekakuan yang dihasilkan.

**Kata Kunci** : balok beton bertulang, kekakuan, daktilitas.

### Abstract

*Beam stiffness ( $EI$ ) is one of the main parameters of a structure's resistance to bending deformation. Calculation of beam stiffness parameters by deflection method must pay attention to the capacity and ductility of beam construction. Structural elements with high ductility can absorb more energy than structural elements with small ductility, likewise the vertical stiffness distribution that is not good can cause damage to collapse. The purpose of this study was to determine the stiffness, capacity, and ductility of multiple reinforced concrete beams. The tested beams measure 75 mm x 150 mm x 1100 mm with variations in concrete quality, namely K-300, K-350 and K-400. The test method uses the three-point method where the test method uses 2 pedestals and 1 suppressor. The test results show that with an increase in stiffness it tends to be linear with an increase in concrete quality. The stiffness that must be considered is the quality of the concrete because the increasing quality of the concrete used affects the resulting stiffness.*

**Keywords** : reinforced concrete beam, stiffness, ductility.

## 1. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Beton bertulang merupakan salah satu konstruksi yang seringkali digunakan dalam berbagai pembangunan, baik untuk gedung bertingkat, jembatan, bendungan, terowongan, pengerasan jalan dan sebagainya. Konstruksi balok dengan menggunakan beton bertulang ini dimaksudkan supaya balok dapat mempunyai gaya lentur dan mempunyai kekakuan sehingga dapat menerima beban maupun gaya-gaya yang bekerja pada konstruksi suatu bangunan. Struktur beton bertulang yang mengalami lentur harus direncanakan agar mempunyai kekakuan yang cukup untuk membatasi lendutan yang mungkin memperlemah kekuatan maupun kemampuan layan struktur pada beban kerja.

Kekakuan struktur pada bangunan merupakan unsur yang sangat penting dalam perancangan struktur bangunan tahan gempa, dikarenakan kekakuan sangat mempengaruhi respon struktur terhadap gaya gempa. Masalah kekakuan akan sangat berpengaruh terhadap respons struktur karena gaya gempa. Struktur bangunan tahan gempa yang dikehendaki harus memiliki kekuatan dan daktilitas yang cukup baik agar dapat menahan beban.

### B. Rumusan Masalah

Maka rumusan masalah yang akan dibahas antara lain :

1. Bagaimana nilai kekakuan balok beton bertulang rangkap dengan agregat normal hasil eksperimen ?
2. Bagaimana kapasitas balok beton bertulang rangkap dengan agregat normal antara eksperimen dan teoritis ?
3. Bagaimanakah nilai daktilitas balok beton bertulang rangkap dengan agregat normal hasil eksperimen ?

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Tinjauan Umum

Beton bertulang adalah kombinasi dari beton serta tulangan baja, yang bekerja secara bersama-sama untuk memikul beban yang ada. Beton mempunyai kekuatan tarik yang rendah, sedangkan tulangan baja akan memberikan

kekuatan tarik yang besar. Karena kelebihan masing-masing elemen tersebut, maka komposisi antara beton dan tulangan baja diharapkan dapat bekerja sama untuk menahan gaya-gaya yang bekerja.

### B. Kekakuan

Kekakuan merupakan kemampuan elemen untuk menerima beban tanpa mengakibatkan terjadinya deformasi atau defleksi. Kekakuan yang diperoleh berdasarkan hubungan antara beban ( $P$ ) dan lendutan ( $\Delta$ ) yang terjadi pada saat balok beton bertulang mengalami retakan pertama atau dalam kondisi elastis. Kondisi elastis merupakan kondisi dimana balok dapat kembali ke bentuk semula setelah dibebani tanpa mengalami perubahan bentuk. Kekakuan dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$K = \frac{P}{\Delta}$$

dimana :

$K$  : kekakuan (N/mm)

$P$  : beban (N)

$\Delta$  : lendutan (mm)

### C. Daktilitas

Daktilitas merupakan kemampuan suatu struktur untuk mengalami lendutan yang cukup besar pada saat beban maksimal tanpa mengalami penurunan kekuatan yang berarti sebelum terjadi keruntuhan, (Park and Paulay, 1975). Pada saat gempa terjadi, daktilitas pada struktur bangunan mengakibatkan terjadinya sendi plastis secara bertahap. Semakin banyak sendi plastis yang terjadi pada daktilitas struktur, semakin banyak pula energi yang diserap oleh struktur tersebut. Daktilitas dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

dimana :

$\mu$  : daktilitas

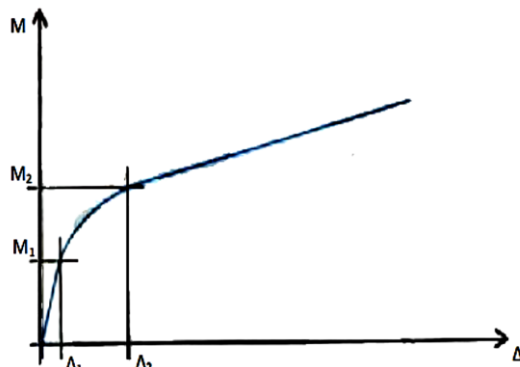
$\Delta_u$  : lendutan *ultimate*

$\Delta_y$  : lendutan leleh pertama

Dimana lendutan *ultimate* didapatkan dari hasil pengujian balok beton bertulang pada saat balok mengalami kapasitas beban maksimum. Sedangkan lendutan leleh pertama didapatkan pada saat balok mengalami retak pertama.

#### D. Jenis-jenis Keruntuhan pada Balok Beton Bertulang

Ketika struktur balok diberi beban yang tidak melebihi kapasitas tahanan dalamnya, maka retak tidak akan muncul. Jika beban pada struktur balok berlebihan, maka akan muncul retakan pada penampang yang menyebabkan penampang balok tidak sebaik sebelum pembebanan berlebih. Hubungan non linear balok beton bertulang terlihat pada **Gambar 1** berikut.



**Gambar 1.** Hubungan non linear – balok beton bertulang

(Sumber : W.C. Vis dan Gideon Kusuma, 1993) dimana :

- $M_1$  : momen pada retak pertama  
 $M_2$  : momen pada saat retakan telah berkembang  
 $\Delta_1$  : lendutan pada saat retak pertama  
 $\Delta_2$  : lendutan pada saat retakan telah berkembang

Keruntuhan dibagi menjadi tiga pola retak (*failure mode*) yakni sebagai berikut :

1. Keruntuhan Tarik  
Keruntuhan ini dimulai dengan munculnya retak rambut pada daerah zona tidak adanya gaya lintang. Retakan ini berarah tegak lurus terhadap garis netral pada penampang.
2. Keruntuhan Diagonal Tarik  
Keruntuhan ini terjadi ketika kekuatan balok pada diagonal tarik lebih kecil dibandingkan kekuatan lenturnya. Retakan awal terjadi di tengah bentang, berarah vertikal berupa retak halus yang diakibatkan oleh lentur.
3. Keruntuhan Geser  
Keruntuhan ini dimulai dengan munculnya retak lentur halus vertikal di tengah bentang dan tidak terus menjalar. Kemudian muncul retak miring yang lebih curam dari retakan

diagonal tarik secara tiba-tiba dan merambat menuju arah sumbu netral.

### 3. METODE PENELITIAN

#### A. Lokasi Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Beton Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jember dan Laboratorium Universitas Jember.

#### B. Pengujian Agregat

Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh hasil yang menggambarkan sifat atau karakteristik terhadap agregat halus maupun agregat kasar. Pengujian tersebut terdiri dari berat jenis, kadar air, penyerapan air, berat volume, kadar lumpur, dan analisa ayakan agregat.

#### C. Pengujian Tulangan

Pengujian tulangan ini yaitu baja tulangan polos dengan diameter 8 mm dan panjang 50 cm yang dijepitkan pada mesin UTM (*Universal Testing Machine*). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tegangan dan regangan yang terjadi pada tulangan tersebut.

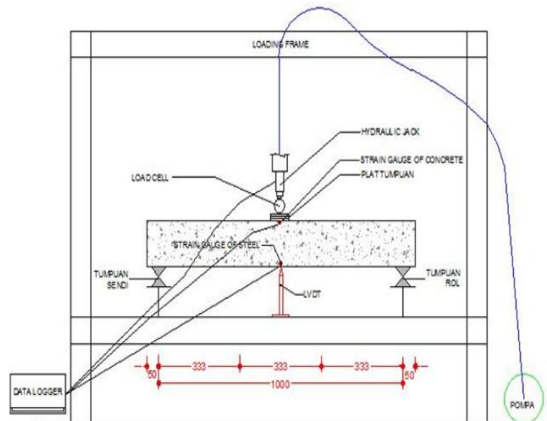
#### D. Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian ini menggunakan benda uji berbentuk silinder sebanyak 6 buah dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm yang telah dilakukan perawatan pasca pengecoran (*curing*) dengan cara direndam selama 28 hari.

#### D. Pengujian Kuat Lentur Balok

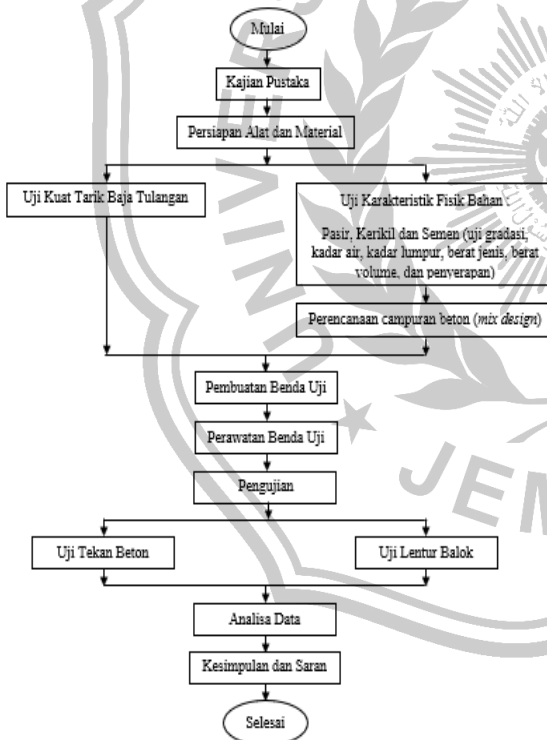
Pengujian ini menggunakan benda uji balok sebanyak 6 buah dengan mutu beton K-300, K-350, dan K-400 berukuran 75 mm x 150 mm x 1100 mm yang diletakkan diatas dua tumpuan sendi dan rol dengan jarak  $\frac{1}{2} L$  dan  $\frac{1}{2} L$  dari tumpuan. *Strain gauge* dihubungkan dengan *strain indicator* untuk mengetahui regangan yang terjadi. Sedangkan untuk mendeteksi lendutan yang terjadi dipasang LVDT tepat di tengah bentang balok. Pembebanan dilakukan secara bertahap per beban 100 kg dengan alat *hand hydraulic pump*. Pola keruntuhan balok diamati dan diidentifikasi melalui retakan yang terjadi, mulai pada saat retakan pertama sampai beban

maksimum (balok runtuh). *Set-up* pengujian benda uji balok beton bertulang seperti pada **Gambar 2** berikut.



**Gambar 2.** Set-up pengujian benda uji balok beton bertulang  
 (Sumber : Penulis, 2022)

**E. Diagram Alur Penelitian**



**Gambar 3.** Diagram alur penelitian  
 (Sumber : Penulis, 2022)

**4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**A. Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan**

Hasil dari uji tarik terhadap material baja tulangan polos dapat dilihat seperti pada **Tabel 1** berikut.

**Tabel 1.** Hasil pengujian kuat tarik baja tulangan

No. Sampel	Diameter mm	Modulus (E) MPa	Tensile Strength (Rm) MPa	Lower Yield Strength (ReL) MPa
1.	7.545	203155.89	636.11	456.87
2.	7.636	202943.91	651.68	478.19
3.	7.624	208852.66	651.18	475.68
Rata-rata		204984.15	646.32	470.25

(Sumber : Pengolahan data, 2022)

**B. Pengujian Kuat Tekan Beton**

Data hasil pengujian kuat tekan beton berumur 28 hari dengan mutu beton K-300, K-350, dan K-400, dapat dilihat seperti pada **Tabel 2** berikut.

**Tabel 2.** Hasil pengujian kuat tekan beton

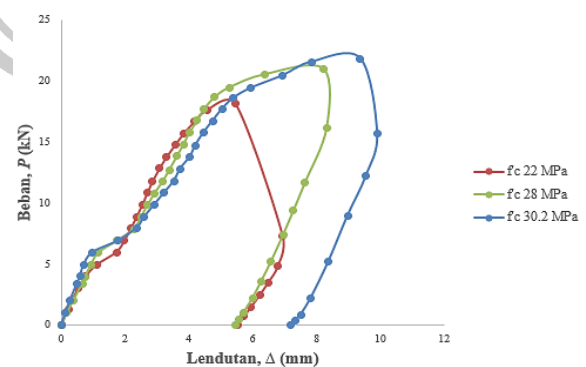
No. Sampel	Berat kg	Beban Maksimum kN	Luas Penampang mm <sup>2</sup>	Kuat Tekan Silinder MPa	Rata-rata MPa
K-300 A	12.69	392	17662.5	22.2	22.0
K-300 B	12.82	385	17662.5	21.8	
K-350 A	12.60	480	17662.5	27.2	28.0
K-350 B	12.85	510	17662.5	28.9	
K-400 A	12.70	595	17662.5	33.7	30.2
K-400 B	12.65	472	17662.5	26.7	

(Sumber : Pengolahan data, 2022)

**C. Pengujian Kuat Lentur Balok**

**a. Hubungan Beban dengan Lenturan**

Dari hasil pengujian diperoleh hubungan antara beban dan lendutan yang diperlihatkan seperti pada **Gambar 4** berikut.



**Gambar 4.** Hubungan beban-lendutan  
 (Sumber : Pengolahan data, 2022)

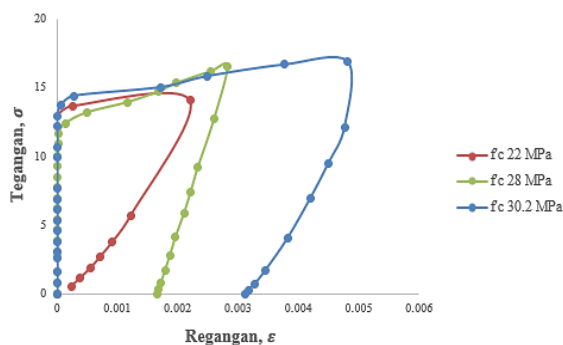
Berdasarkan pada gambar diatas bahwa hubungan beban dan lendutan  $f'c$  22 MPa pada awal pembebanan menunjukkan perilaku elastis penuh sampai beban 4.93 kN atau pada retak awal terjadi. Kurva setelah retak awal terjadi, cenderung linier sampai  $P_{ultimate}$  sebesar 18.14 kN.

Pola hubungan beban dan lendutan  $f'c$  28 MPa hampir sama dengan  $f'c$  22 MPa, namun ada peningkatan beban retak awal sebesar 0.96 kN menjadi 5.89 kN. Kurva setelah retak awal terjadi, lebih landai dari  $f'c$  22 MPa, namun masih berperilaku linier sampai  $P_{ultimate}$  sebesar 21.00 kN.

Pola hubungan beban dan lendutan  $f'c$  30.2 MPa hampir sama dengan  $f'c$  28 MPa, namun ada peningkatan beban retak awal sebesar 0.05 kN menjadi 5.94 kN. Kurva setelah retak awal terjadi, lebih landai dari  $f'c$  28 MPa, namun masih berperilaku linier sampai  $P_{ultimate}$  sebesar 21.83 kN. Hal ini dapat dilihat dari pola retak yang lebih menyebar. Lendutan bertambah seiring dengan bertambahnya beban tanpa mengalami keruntuhan dan kembali datar setelah pelepasan beban tanpa kerusakan yang berarti. Pengaruh  $f'c$  terhadap retak awal yaitu, semakin naik  $f'c$  maka semakin naik retak awal yang terjadi pada balok beton bertulang rangkap.

#### b. Hubungan Tegangan dengan Regangan

Tegangan dapat dihitung menggunakan rumus  $\sigma = \frac{M.y}{I}$  dimana  $\sigma$  adalah tegangan, M adalah momen lentur, y adalah jarak terhadap sumbu netral, dan I adalah momen inersia. Dari hasil pengujian diperoleh hubungan antara tegangan dan regangan yang diperlihatkan seperti pada **Gambar 5** berikut.



**Gambar 5.** Hubungan tegangan-regangan  
 (Sumber : Pengolahan data, 2022)

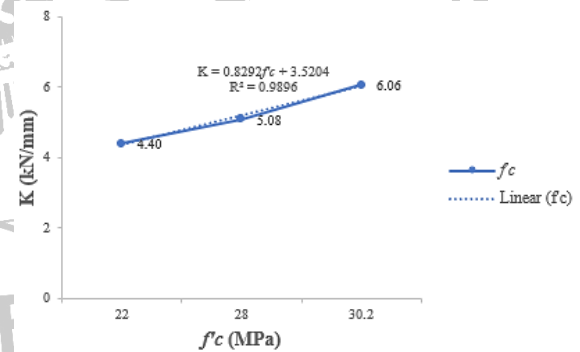
Berdasarkan pada gambar diatas bahwa kurva setelah retak awal terjadi cenderung non linier. Tetapi peningkatan tegangan terjadi hingga batas maksimum terletak pada  $P_{ultimate}$ . Ketika beban terus ditambahkan maka pada suatu ketika nilai tegangan akan menurun hingga akhirnya putus (tegangan = 0). Pada  $f'c$  22 MPa regangan muncul sebesar 0.000262 saat 0.9  $P_{ultimate}$ . Pada  $f'c$  28 MPa regangan muncul sebesar 0.00014 saat 0.7  $P_{ultimate}$ . Sedangkan pada  $f'c$  30.2 MPa regangan muncul sebesar 0.00059 saat 0.6  $P_{ultimate}$ .

#### D. Pengolahan Data Hasil Pengujian

Data yang didapatkan dari hasil uji laboratorium kemudian dilakukan kajian. Pengkajian tersebut meliputi menghitung nilai kekakuan dan daktilitas pada balok beton bertulang rangkap.

##### a. Kekakuan

Nilai kekakuan dapat dianalisa dari data beban saat retak pertama dan lendutan saat retak pertama yang tercatat saat pengujian. Data hasil perhitungan kekakuan balok dapat dilihat pada **Gambar 6** berikut.



**Gambar 6.** Kekakuan  
 (Sumber : Pengolahan data, 2022)

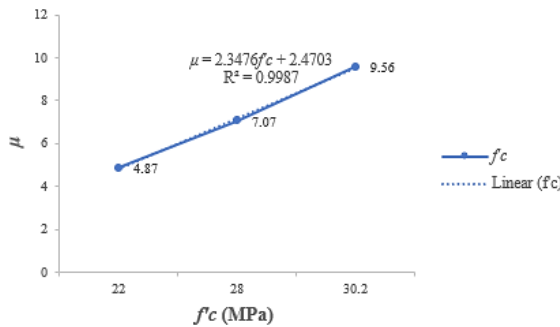
Berdasarkan pada gambar kekakuan balok diatas, dimana ditunjukkan dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0.9896$ . Hal ini menunjukkan bahwa 98.96% kenaikan kekakuan itu dipengaruhi oleh mutu beton sedangkan sisanya yaitu 1.04% dipengaruhi oleh faktor lain seperti ketidaksempurnaan saat campuran beton.

Kekakuan balok mengalami peningkatan dengan bertambahnya  $f'c$  yang digunakan. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa

mutu beton memberikan pengaruh nyata terhadap kekakuan yang dihasilkan.

### b. Daktilitas

Nilai daktilitas dapat dianalisa dari data lendutan leleh pertama pada saat balok mengalami retak pertama dan lendutan *ultimate* pada saat balok mengalami beban maksimum. Data hasil perhitungan daktilitas dapat dilihat pada **Gambar 7** berikut.



**Gambar 7. Daktilitas**  
 (Sumber : Pengolahan data, 2022)

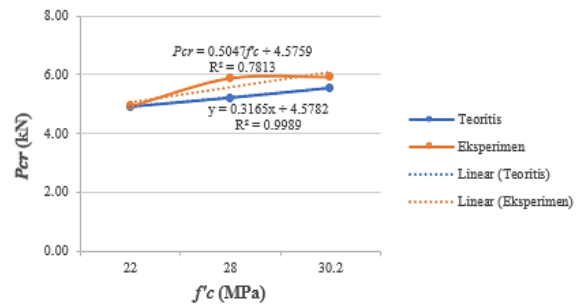
Berdasarkan pada gambar daktilitas diatas, dimana ditunjukkan dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0.9987$ . Hal ini menunjukkan bahwa 99.87% kenaikan daktilitas itu dipengaruhi oleh mutu beton, sedangkan sisanya yaitu 0.13% dipengaruhi oleh faktor lain seperti ketidaksempurnaan saat campuran beton.

Daktilitas mengalami peningkatan dengan bertambahnya  $f_c$  yang digunakan. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa mutu beton memberikan pengaruh nyata terhadap daktilitas yang dihasilkan.

### E. Perbandingan Hasil Kapasitas Lentur

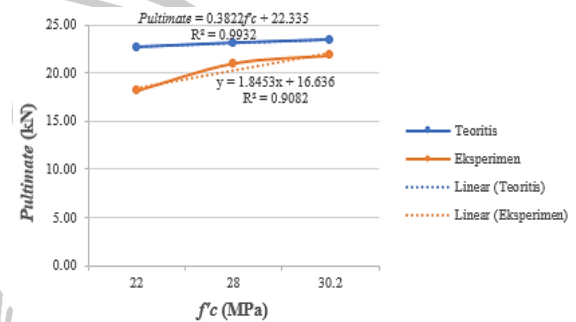
Perbandingan hasil teoritis kapasitas lentur dengan hasil eksperimen balok antara  $P_{cr}$  dan  $P_{ultimate}$  dapat dilihat seperti pada **Gambar 8 dan 9**.

Berdasarkan pada **Gambar 8**, dimana  $P_{cr}$  hasil eksperimen ditunjukkan dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0.7813$ . Bahwa  $P_{cr}$  hasil eksperimen lebih tinggi dibandingkan  $P_{cr}$  hasil teoritis. Sedangkan pada **Gambar 9**, dimana  $P_{ultimate}$  hasil teoritis ditunjukkan dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0.9932$ . Bahwa  $P_{ultimate}$  hasil teoritis lebih tinggi dibandingkan  $P_{ultimate}$  hasil eksperimen.



**Gambar 8. Perbandingan  $P_{cr}$  hasil teoritis dan eksperimen**

(Sumber : Pengolahan data, 2022)



**Gambar 9. Perbandingan  $P_{ultimate}$  hasil teoritis dan eksperimen**

(Sumber : Pengolahan data, 2022)

## 5. KESIMPULAN

### A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dianalisa, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengaruh mutu beton terhadap kekakuan balok menunjukkan kenaikan dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0.9896$ . Maka pada  $f_c$  22 MPa didapatkan nilai kekakuan sebesar 4.40 kN/mm,  $f_c$  28 MPa didapatkan nilai kekakuan sebesar 5.08 kN/mm, dan  $f_c$  30.2 MPa didapatkan nilai kekakuan sebesar 6.06 kN/mm.
2. Pengaruh mutu beton terhadap kapasitas balok pada  $P_{cr}$  hasil teoritis dan eksperimen, dimana  $P_{cr}$  hasil eksperimen ditunjukkan dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0.7813$ . Sedangkan  $P_{ultimate}$  hasil teoritis dan eksperimen, dimana  $P_{ultimate}$  hasil teoritis ditunjukkan dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0.9932$ .
3. Pengaruh mutu beton terhadap daktilitas menunjukkan kenaikan dengan koefisien

determinasi  $R^2 = 0.9987$ . Maka pada  $f'c$  22 MPa didapatkan nilai daktilitas sebesar 4.87,  $f'c$  28 MPa didapatkan nilai daktilitas sebesar 7.07, dan  $f'c$  30.2 MPa didapatkan nilai daktilitas sebesar 9.56.

berdasarkan SKSNI T-15-1991-03-CUR edisi kedua.

Windah, R. S., & Pandaleke, R. (2019). Perhitungan Lendutan Balok Taper Kantilever dengan Menggunakan SAP2000. *Jurnal Sipil Statik*, 7 (8), 1039-1048

## B. Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan sebagai acuan pengembangan selanjutnya adalah seperti berikut :

1. Sebelum melakukan pengujian dilakukan kalibrasi pada semua alat yang akan digunakan, sehingga akan menghasilkan data yang valid.
2. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan jenis dan varian semen yang berbeda.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- Almufid. 2015. Beton Mutu Tinggi dengan Bahan Tambahan. *Jurnal Fondasi*, 4(2), 81–87.
- Badan Standarisasi Nasional. 2011. Tentang Tata Cara Pembuatan Dan Perawatan Beton Uji Di Laboratorium, (SNI 2493:2011), Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2011. Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder, (SNI 1974:2011), Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2011. Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal Dengan Dua Pembebanan, (SNI 4431:2011), Jakarta.
- Belanger, Kenneth., 1981. *Dynamic Stiffness of Concrete Beams*. Journal Proceedings. American Concrete Institute. American.
- Park R., and Paulay T. 1975. *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons Inc, Newyork.
- Parmo dan Taufikurrahman. 2014. Perbaikan Kekuatan dan Daktilitas Balok Beton Bertulang Menggunakan Glass Fibre Reinforced Polymer Strips, *Jurnal Ilmu Ilmu Teknik*, Vol.X No.3, Universitas Wisnuwardhana, Malang.
- Paulay, T. and Priestlay, M.J.N. 1992. “*Seismic Design in Reinforced Concrete and Masonry Building*”, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Vis, W.C. dan Gideon Kusuma., 1993. *Dasar-dasar Perencanaan Beton Bertulang*