

Komparasi Momen Retak Teoritis Dan Eksperimen Balok Beton Bertulang Rangkap Dengan Agregat Normal

Comparison Of Theoretical Cracking Moments And Concrete Beam Experiments double Reinforced With Normal Aggregate

Wahyu Nur Aprillia¹, Muhtar², Amri Gunasti³

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Email : liaayil2004@gmail.com

²Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Email : amrigunasti@unmuhjember.ac.id

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Email : muhtar@unmuhjember.ac.id

Abstrak

Retak merupakan bentuk kerusakan yang paling sering terjadi pada struktur beton, dimana terdapat celah antara massa beton yang relatif panjang dan sempit. Secara visual retakan tersebut terlihat seperti garis, pada dasarnya terdapat empat jenis keretakan pada balok yaitu: retak lentur, retak geser-lentur, retak punter dan retak lekatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perbandingan momen retak (M_{cr}) eksperimen dan momen retak (M_{cr}) teoritis pada balok beton bertulang rangkap dengan agregat normal. 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 metode *three-point method* yang cara pengujiannya menggunakan 2 tumpuan dan 1 penekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola retak teoritis lebih awal tercapai 27-38 % daripada eksperimen, sedangkan pengaruh mutu beton menunjukkan bahwa nilai momen retak semakin tinggi seiring dengan kenaikan mutu beton. Pola retak yang terjadi pada keseluruhan benda uji dengan variasi mutu beton yang berbeda adalah retak lentur.

Kata Kunci: Momen Retak, Pola Retak, Balok Beton Bertulang Rangkap.

Abstract

Cracks are the most common form of damage to concrete structures, where there are relatively long and narrow gaps between the concrete masses. Visually the cracks look like lines, basically there are four types of cracks in the beam, namely: flexural cracks, shear-bending cracks, torsional cracks and bonding cracks. This study aims to evaluate the comparison of experimental cracking moment (M_{cr}) and theoretical cracking moment (M_{cr}) of reinforced concrete beams with normal aggregate. 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 in which the test method uses 2 supports and 1 suppressor. The results showed that the theoretical crack pattern was reached 27-38% earlier than the experiment, while the effect of concrete quality showed that the value of the cracking moment was higher as the quality of the concrete increased is a flexural crack.

Keywords: Cracking moment, Crack pattern, Double reinforced concrete beam.

1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dalam dunia konstruksi, beton bertulang adalah jenis struktur yang sering digunakan. Hal ini disebabkan oleh kelebihan material penyusunnya, beton yang memiliki kemudahan dalam pengerjaannya, kuat tekan yang tinggi serta memiliki nilai ekonomis dalam pembuatan dan perawatannya, sedangkan baja yang memiliki kuat tarik dan daktilitas yang besar.

Beton sederhana sebagai elemen balok harus diberi penulangan yang berupa penulangan lentur (memanjang) dan penulangan geser. Penulangan lentur dipakai untuk menahan pembebanan momen lentur yang terjadi pada balok. Penulangan geser (penulangan sengkang) digunakan untuk menahan pembebanan geser (gaya lintang) yang terjadi pada balok.

Keruntuhan akibat geser sangat kompleks dibandingkan keruntuhan akibat lentur karena banyak hal yang mempengaruhi terjadinya keruntuhan tersebut, antaranya kuat tekan beton ($f'c$), rasio tulangan longitudinal (ρl), perbandingan bentang geser dengan tinggi efektif (a/b), dan perbandingan panjang bersih balok terhadap tinggi efektif (l_e/d) serta sudut kemiringan retaknya (Astariani, N.K. 2010).

Pada dasarnya terdapat empat jenis keretakan pada balok yaitu: retak lentur, retak geser-lentur, retak punter dan retak lekatan. Meskipun retak tidak dapat dicegah, namun ukurannya dapat dibatasi dengan cara menyebar atau mendistribusikan tulangan. Oleh karena itu penulis merasa perlu untuk melakukan penelitian terhadap komparasi momen retak teoritis dan eksperimen balok beton bertulang rangkap dengan agregat normal.

B. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana momen retak hasil eksperimen ($M_{cr\ eks}$) dan momen retak teoritis ($M_{cr\ teoritis}$) pada balok beton bertulang rangkap dengan agregat normal?
2. Bagaimana hubungan pola retak dengan variasi mutu beton berbeda pada balok beton bertulang rangkap dengan agregat normal?

3. Bagaimana perbandingan pola retak hasil eksperimen dengan validasi FEA program Diana?

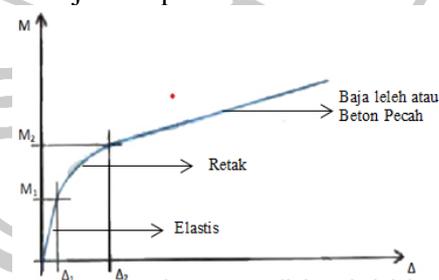
2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pola Retak

Retak adalah jenis kerusakan yang paling sering terjadi dalam struktur beton, dimana terjadi pemisahan antara massa beton yang relatif panjang dengan yang sempit. Secara visual retak nampak seperti garis. Retak dalam struktur beton terjadi sebelum beton mengeras maupun setelah beton mengeras. Retak akan terjadi saat beton mulai mengeras setelah dibebani, beton mengeras dalam musim dingin, susut (*shrinkage*), penurunan (*settlement*) dan penurunan acuan (*formwork*).

B. Jenis-Jenis Keruntuhan Pada Balok Beton Bertulang

Pada saat struktur balok diberi beban dimana tidak melebihi kapasitas tahanan dalamnya, retak tidak akan muncul. Dalam pengertian ini, nilai momen inersia balok tidak terganggu. Bila pembebanan pada struktur balok berlebih maka akan timbul retak pada penampang sehingga keadaan penampang balok tidak sebaik sebelum pembebanan berlebih. Pembebanan berlebih akan menimbulkan retak pada struktur balok sehingga nilai inersia penampang berkurang. Mekanismenya bertambah besar sehingga tegangan tarik pada struktur balok beton melampaui kapasitas kekuatan tariknya, maka akan timbul retakan tertarik. Hubungan non linier-balok beton bertulang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hubungan non linier – balok beton bertulang

(Sumber: Andreas, 2012)

Dimana :

M_1 = Momen pada retak pertama

M_2 = Momen pada saat retakan telah berkembang

Δ_1 = lendutan pada retak pertama

Δ_2 = lendutan pada saat retakan telah berkembang.

C. Lendutan (Δ)

Menurut (Nawy, 1990) lendutan batang-batang struktural merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan atau kondisi ujung bentang (seperti tumpuan terpusat atau beban terdistribusi), dan kekakuan lentur EI dari elemen, dari persamaan umum lendutan maksimum Δ_{maks} pada balok elastis, dapat diperoleh persamaan lendutan pada tengah bentang Δ_{maks} , yaitu:

$$\Delta_{maks} = \frac{Pa(3I_n^2 - 4x^2)}{24 EI_c}$$

Dimana:

- I_n = panjang bentang bersih
- E = modulus elastisitas beton
- I_c = momen inersia penampang
- P = beban titik
- x = jarak P dari tumpuan

D. Daktilitas

Berdasarkan SNI-1726-2012, daktilitas merupakan kemampuan struktur gedung untuk mengalami simpangan pasca-elastik yang besar secara berulang kali dan bolak balik akibat beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelepasan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup sehingga struktur tetap berdiri, walaupun sudah dalam kondisi di ambang keruntuhan.

Faktor daktilitas struktur gedung (μ) adalah rasio antara simpangan ultimit dan simpangan saat terjadi leleh pertama, ditunjukkan seperti pada persamaan berikut:

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

Dimana:

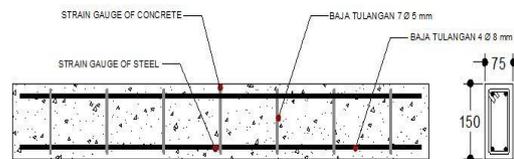
- μ = faktor daktilitas
- Δ_u = lendutan maksimum struktur
- Δ_y = lendutan saat leleh pertama

3. METODOLOGI PENELITIAN

A. Penyiapan Benda Uji

Benda uji terdiri dari balok sederhana dengan ukuran 75 mm x 150 mm x 1100 mm, terdiri dari balok beton bertulang baja (SRC). Tulangan baja dipasang sebagai tulangan tarik berdiameter 5 mm dengan luas tulangan $A_s = 150 \text{ mm}^2$. Tulangan baja yang digunakan sebagai tulangan tekan berdiameter 8 mm dengan luas tulangan $A_s = 100,48 \text{ mm}^2$.

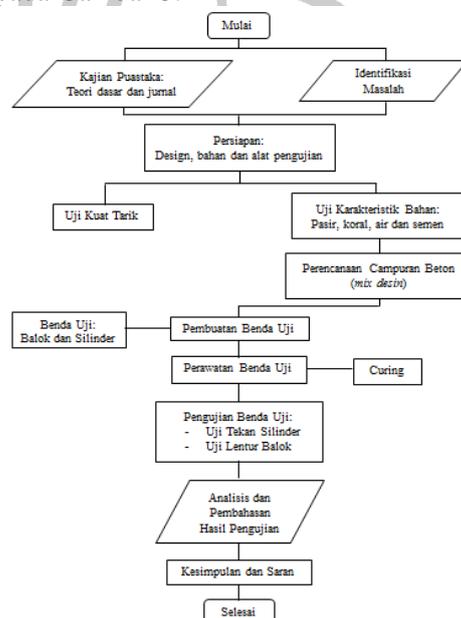
Geometri balok dan detail tulangan balok ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri balok dan detail tulangan balok rangkap (Sumber: Penulis, 2022)

B. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dirangkum dalam bentuk bagan alir sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Bagan alir tahapan penelitian (Sumber: Penulis, 2022)

C. Analisis Data

Data yang diperhitungkan diperoleh dari hasil eksperimen awal yang berupa kuat tarik baja dan kuat tekan beton yang diperoleh dari benda uji silinder. Berikut merupakan data benda uji untuk memperoleh hasil perhitungan secara teoritis:

- Tipe : Beton Bertulang
- Dimensi : 75 mm x 150 mm x 1100 mm
- Kuat tekan beton (f'_c) : 22.00, 28.00, 30,20 Mpa
- Tulangan Pokok : Ø 8 mm
- Tulangan Sengkang : Ø 5 mm
- Elastisitas baja (E_s) : 204984.15 Mpa
- Elastisitas beton (E_c) : 22042.83 Mpa

4. PEMBAHASAN

A. Perhitungan Teoritis Kapasitas Balok

Diketahui:

- Lebar balok (b) = 75 mm
- Tinggi balok (h) = 150 mm
- balok (L) = 1100 mm
- Jarak pusat tulangan tekan ke ujung atas balok (d')
- Jarak pusat tulangan tarik ke ujung atas balok (d)
- Luas tulangan tarik (As)
- Luas tulangan tekan (As')
- Elastisitas baja (Es)
- Elastisitas beton (Ec)
- Kuat tekan beton (f'c)
- Berat isi beton
- Berat pembagi beton
- Perhitungan pembebanan:
- Akibat berat balok sendiri:
 Berat balok (q)
- Akibat beban terpusat (P):
 Momen maksimum

Sehingga,

Momen maksimum total

$$= 3.01 \text{ kg-m} + 0.23p \text{ kg-m}$$

- Rasio modular / angka ekivalen (n)

$$n = E_s/E_c$$

$$= 204984.15/22042.83$$

$$= 9.30$$

- Jarak garis netral (garis pusat transformasi)

$$Y = \frac{b \cdot h \cdot (\frac{1}{2}) \cdot h + (n-1) \cdot A_s \cdot d + (n-1) \cdot A_s' \cdot d'}{b \cdot h + (n-1) \cdot A_s + (n-1) \cdot A_s'}$$

$$= 955338.86/12409.67$$

$$= 77 \text{ mm}$$

$$= 7.7 \text{ cm}$$

$$Y_t = h - Y = 150 - 77$$

$$= 73 \text{ mm}$$

$$= 7.3 \text{ cm}$$

- Momen Inersia

$$I_{gt} = 1/12 \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot (y-h/2)^2 + (n-1) \cdot A_s \cdot (d-y)^2 + (n-1) \cdot A_s' \cdot (y-d')^2$$

$$= 24199348.71 \text{ mm}^4$$

$$= 2419.934871 \text{ cm}^4$$

Retak akan terjadi pada modulus keruntuhan beton

- Modulus pecah beton (f_r)

$$f_r = 0.7 \cdot \sqrt{f'c} = 3.28 \text{ MPa}$$

$$= 35.59 \text{ kg-cm}^2$$

Sehingga momen retak sebesar:

$$- M_{cr} = (f_r \cdot I_{gt})/Y_t$$

$$= 11795.33 \text{ kg-cm}$$

$$= 117.95 \text{ kg-m}$$

Untuk mencari besar P_{cr} maka:

Momen maksimum total = Momen retak

$$3.01 \text{ kg-m} + 0.23p \text{ kg-m} = 117.95$$

$$0.23p \text{ kg-m} = 114.94$$

$$p = 499.75 \text{ kg}$$

$$p = 4.9009 \text{ kN}$$

Perhitungan P_{ultimit} yaitu:

- Keseimbangan gaya

$$C_c = T$$

$$(0.85) \cdot f'c \cdot b \cdot a = A_s \cdot F_y$$

$$1402.50 \times a = 47250.39$$

$$a = 33.69 \text{ mm}$$

- Momen nominal

$$M_n = T \cdot (d-a/2)$$

$$= 47250.39(126-33.69/2)$$

$$= 5157613.09 \text{ Nmm}$$

$$= 535.38 \text{ kg}$$

Sehingga,

M_n = Momen maksimum total

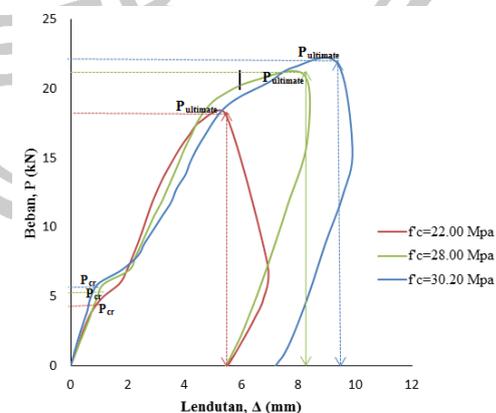
$$535.38 = 3.01 \text{ kg-m} + 0.23p \text{ kg-m}$$

$$P_{ult} = 2314.65 \text{ kg}$$

$$P_{ult} = 22.699 \text{ kN}$$

B. Hubungan Beban dan Lentutan

Pembebanan dilakukan pada titik tengah bentang balok, dimana LVDT diletakkan di bawah balok dengan lokasi center terhadap bentang horizontal balok. Dari data pembacaan *load cell* dan lentutan dapat diolah menjadi grafik yang menggambarkan hubungan beban terhadap lentutan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan Beban dan Lentutan (Sumber: Pengolahan Data, 2022)

Dapat disimpulkan berdasarkan Gambar 4. yaitu grafik gabungan hubungan beban dan lendutan menunjukkan bahwa besar lendutan yang terjadi akan bertambah seiring dengan kenaikan pada pembebanan yang dilakukan. Salah satu pengaruh kenaikan nilai lendutan yaitu pada perbedaan nilai kuat tekan beton. Kondisi awal dari ketiga balok dengan kuat tekan yang berbeda memiliki karakteristik yang sama hingga mulai terjadi perbedaan pada saat kondisi retak, dimana setelah mengalami retak awal grafik merah cenderung landai sedangkan grafik hijau dan biru cenderung lebih tegak.

C. Hubungan Tegangan dan Regangan Beton

Tegangan dan regangan terjadi akibat pembebanan kemudian mengalami deformasi yang berupa lengkungan atau lenturan. Contoh perhitungan tegangan pada balok akibat momen lentur dari sampel balok dengan kuat tekan beton 22.00 MPa dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

Momen Luar (M) : 1231,62 kN/mm

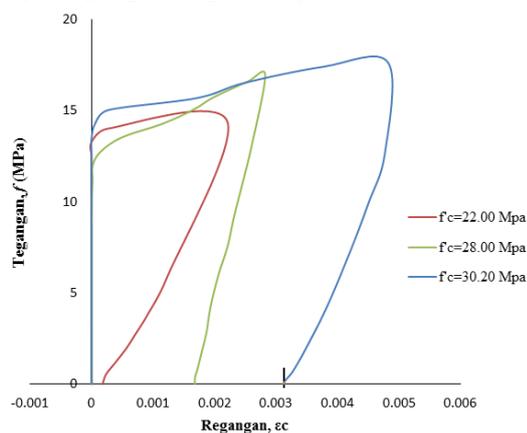
Jarak dari garis netral ke tepi bawah

(y): 75 mm

Momen Inersia (I_{gt}) : 24199348.7 mm⁴

$$f = \frac{M \cdot y}{I_{gt}} = \frac{1231.62 \times 75}{24199348.7} = 0.0038 \text{ MPa}$$

Hubungan tegangan dan regangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan Tegangan dan Regangan Beton

(Sumber: Pengolahan Data, 2022)

Berdasarkan Gambar 5. bentuk kurva awal sampai titik leleh menunjukkan daerah elastis linier, setelah mencapai titik leleh baja tulangan mengalami penambahan regangan dengan sedikit atau tanpa adanya penambahan tegangan. Kemudian baja tulangan memasuki

daerah *strain hardening* dimana penambahan regangan diikuti oleh penambahan tegangan yang cukup besar dan hal ini terus berlangsung sampai tegangan maksimum, setelah melewati tegangan maksimum terjadi tegangan patah setelah tegangan patah, pola hubungan hubungan tegangan-regangan cenderung kembali ke nol.

D. Momen Retak

Momen retak merupakan momen yang terjadi pada balok saat terjadinya retak pertama. Contoh perhitungan momen retak (M_{cr}) dari sampel balok dengan kuat tekan beton 22.00 MPa dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

Retak Awal (P_{cr}) : 4.93 kN

Beban (q) : 0.2648 kN/m

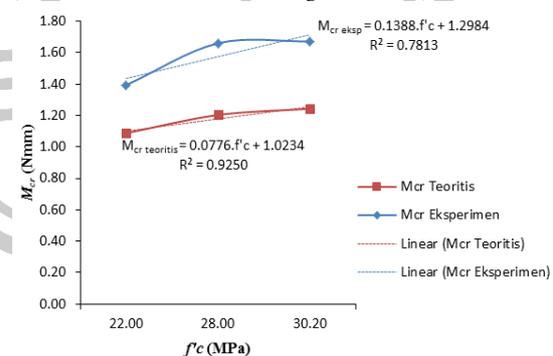
Panjang Balok (L) : 1.1 m

$$\begin{aligned} M_{cr} &= \left(\frac{1}{4} \cdot P \cdot L\right) + \left(\frac{1}{8} \cdot q \cdot L^2\right) \\ &= \left(\frac{1}{4} \times 4.93 \times 1.1\right) + \left(\frac{1}{8} \times 0.2648 \times 1.1^2\right) \\ &= 1.39 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

Tabel 1. Perbandingan Nilai Momen Retak Hasil Teoritis dan Eksperimen

No	Kuat Tekan Beton (MPa)	M_{cr} Teoritis (kN-m)	M_{cr} Eksperimen (kN-m)	Nilai Banding (%)
1	22.00	1.09	1.39	22%
2	28.00	1.20	1.66	28%
3	30.20	1.24	1.67	26%

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2022)



Gambar 6. Hasil Perbandingan Nilai Momen Retak Hasil Teoritis dan Eksperimen

(Sumber: Pengolahan Data, 2022)

Pengaruh kuat tekan beton ($f'c$) terhadap momen retak (M_{cr}) secara teoritis terdapat pada Gambar 4.12 dimana ditunjukkan dengan koefisien determinasi $R^2 = 0.9250$, hal ini menunjukkan 92.50 % kenaikan nilai M_{cr} itu dipengaruhi oleh kuat tekan beton sedangkan sisanya 7.5 % dipengaruhi oleh faktor lain. Sedangkan hasil eksperimen ditunjukkan dengan $R^2 = 0.7813$ hal ini menunjukkan 78.13 % kenaikan nilai M_{cr} itu dipengaruhi oleh kuat tekan beton sedangkan sisanya 21.87 % dipengaruhi oleh ketidakteknelian dalam pengujian (*human error*).

Dari hasil perhitungan retak maksimum teoritis dan hasil pengujian pada balok yang terdapat pada Tabel 1. didapatkan selisih 22 % untuk kuat tekan beton 22.00 MPa dan 28 % untuk kuat tekan beton 28.00 MPa, sedangkan dengan menggunakan kuat tekan beton 30.20 MPa didapatkan selisih sebesar 26 %.

E. Daktilitas

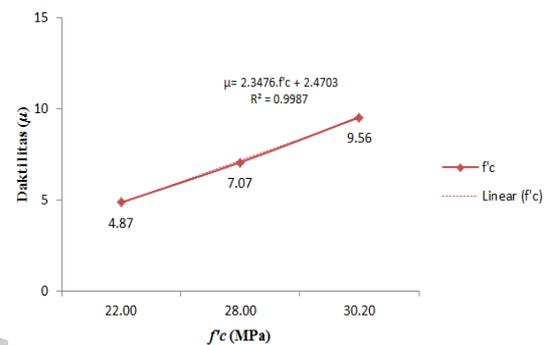
Daktilitas merupakan perbandingan antara lendutan pada saat beban ultimit dan beban leleh yang mencerminkan kemampuan elemen struktur untuk melakukan perubahan bentuk elastis-plastis tanpa mengalami keruntuhan. Contoh perhitungan daktilitas diambil dari sampel kuat tekan beton 22.00 MPa, sebagai berikut:

Lendutan saat leleh (Δ_y) = 1.12 mm
 Lendutan saat maksimum (Δ_u)=5.45 mm

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{5.45}{1.12} = 4.8661$$

Tabel 2. Hasil Pengujian Daktilitas

Kuat Tekan Beton (MPa)	Lendutan Leleh (Δ_y) (mm)	Lendutan Maksimum (Δ_u) (mm)	Daktilitas
22.0	1.12	5.45	4.87
28.0	1.16	8.2	7.07
30.2	0.98	9.37	9.56



(Sumber: Hasil Perhitungan, 2022)

Gambar 7.

Hasil Pengujian Daktilitas (Sumber: Pengolahan Data, 2022)

Pengaruh kuat tekan beton terhadap daktilitas terdapat pada Gambar 4.13 dimana ditunjukkan dengan koefisien determinasi $R^2=0.9987$, hal ini menunjukkan bahwa 99.87% kenaikan daktilitas itu dipengaruhi oleh kuat tekan beton sedangkan sisanya 0.13% dipengaruhi oleh faktor lain. Dari tabel 2. seperti yang ditunjukkan bahwa balok dengan $f'c = 22.00$ MPa memperoleh nilai daktilitas 4.87 dan dengan menggunakan $f'c = 28.00$ MPa diperoleh daktilitas sebesar 7.07 sedangkan balok dengan kuat tekan $f'c = 30.20$ MPa didapatkan nilai daktilitas sebesar 9.56.

F. Perbandingan Hasil Nilai Teoritis dan Eksperimen

Berikut merupakan hasil teoritis kapasitas lentur dengan nilai kapasitas lentur dari eksperimen balok seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Nilai Teoritis dan Eksperimen

$f'c$ (MPa)	Teoritis						Eksperimen		Pola Retak
	P_{cr} (kN)	M_{cr} (kN/m)	P_{ult} (kN)	P_{cr} (kN)	M_{cr} (kN/m)	P_{ult} (kN)	Daktilitas μ		
22.00	4.90	1.09	22.70	4.93	1.39	18.14	4.87	Retak Lentur	
28.00	5.20	1.20	23.14	5.89	1.66	21.00	7.07	Retak Lentur	
30.20	5.53	1.24	23.46	5.94	1.67	21.83	9.56	Retak Lentur	

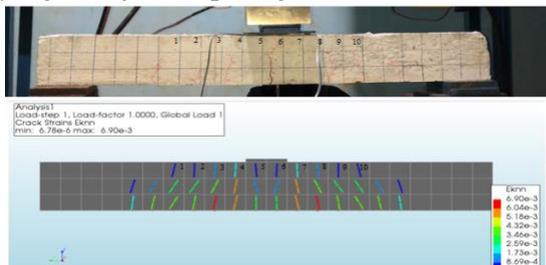
(Sumber: Hasil Perhitungan, 2022)

Dari Tabel 3. diagram perbandingan tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa nilai kapasitas lentur retak awal dan momen retak hasil eksperimen lebih besar dibandingkan hasil perhitungan teoritis, hal ini didukung oleh Yohanes (2015) dalam penelitian yang menunjukkan bahwa semakin tinggi kuat tekan beton, maka kuat lentur juga akan meningkat. Hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur selalu bersifat parabola. Oleh karena itu, dengan menggunakan variasi kuat tekan beton yang berbeda pada penelitian dapat disimpulkan bahwa semakin brsar kuat tekan yang digunakan maka semakin tinggi nilai

retak awal, momen retak maupun pada kondisi retak ultimit.

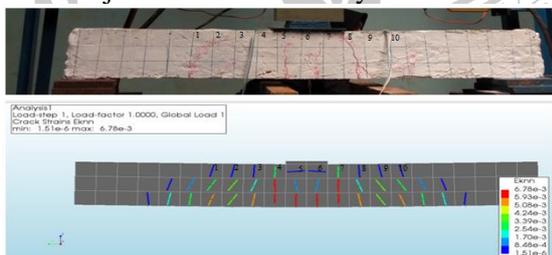
G. Pola Retak Pada Balok

Pola retak yang terjadi pada balok seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



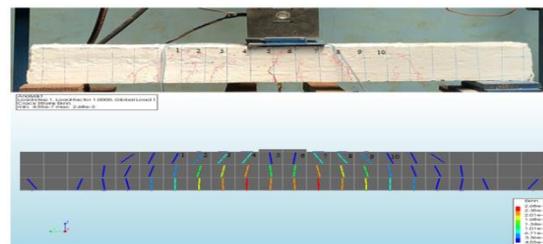
Gambar 8. Pola Retak Balok Hasil Eksperimen dan Validasi FEA dengan Kuat Tekan Beton $f'c = 22.00$ MPa (Sumber: Hasil Pengujian, 2022)

Berdasarkan Gambar 8. retak awal terjadi pada beban 4.93 kN dibagian balok sisi tarik, peningkatan beban dapat menimbulkan retak baru ditempat lain, tetapi ada juga yang memperlebar atau memperpanjang retak sebelumnya. Pada saat beban maksimum 18.14 kN retakan sudah melewati garis netral yang berarti beton sudah mulai runtuh dan tidak ada kemampuan untuk menahan beban lagi. Retak yang terjadi adalah retak lentur ditunjukkan pada kotak 6 dengan lebar retak awal 0.016 mm dan jumlah retakan sebanyak 74 retakan.



Gambar 9. Pola Retak Balok Hasil Eksperimen dan Validasi FEA dengan Kuat Tekan Beton $f'c = 28.00$ MPa (Sumber: Hasil Pengujian, 2022)

Mekanisme pola retak balok pada Gambar 9. diawali dengan retak rambut ke arah atas balok pada bagian tengah bentang saat beban mencapai 5.89 kN. Kemudian retak bertambah seiring dengan penambahan beban hingga mencapai beban maksimum sebesar 21.00 kN. Retak yang terjadi berupa retak lentur yang ditunjukkan pada kotak 5 dengan lebar retak awal 0.018 mm dan jumlah retakan sebanyak 97 retakan.



Gambar 10. Pola Retak Balok Hasil Eksperimen dan Validasi FEA dengan Kuat Tekan Beton $f'c = 30.20$ MPa (Sumber: Hasil Pengujian, 2022)

Berdasarkan Gambar 10. balok dengan menggunakan kuat tekan 30.20 MPa pada saat pengujian lentur balok diawali dengan retak rambut ke atas balok pada bagian tengah bentang saat beban mencapai beban 5.94 kN. Kemudian retak mulai bertambah seiring dengan penambahan beban hingga mencapai beban maksimum sebesar 21.83 kN. Retak yang terjadi pada balok berupa retak lentur yang ditunjukkan pada kotak 6 dengan lebar retak awal 0.019 mm dan jumlah retakan sebanyak 106 retakan.

H. Validasi Menggunakan Aplikasi Diana FEA

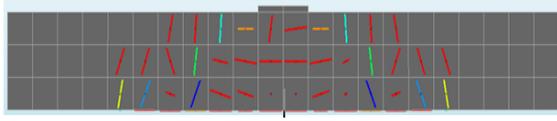
Validasi ini dilakukan untuk melihat kesesuaian antara hasil dari pengujian eksperimen balok dengan hasil dari simulasi aplikasi Diana FEA. Ada beberapa hasil simulasi dengan aplikasi Diana FEA yang akan dibandingkan dengan hasil pengujian eksperimen, yaitu: Nilai beban pada retak awal, beban pada saat *ultimate*, lendutan dan pola retak. Adapun data-data yang disimulasikan pada aplikasi Diana FEA terdapat pada Tabel 4. Sebagai berikut:

Tabel 4. Spesifikasi Material Aplikasi Diana FEA

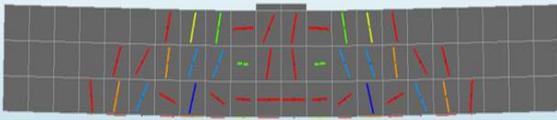
Bat Type and Concrete	Diameter (d)	Modulus Elastisitas (E)	Poisson's Ratio	Lower Yield Strength (f_y)	Compressive Strength (f_c)
	(mm)	(MPa)		(MPa)	(MPa)
Stell	ø 8	204984.16	0.27	470.25	-
Concrete	-	22044.95	0.2	-	22.00
Concrete	-	24870.06	0.2	-	28.00
Concrete	-	25828.63	0.2	-	30.20

(Sumber: Pengolahan Data, 2022)

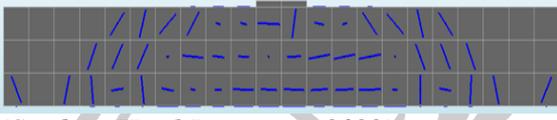
Tegangan maksimum yang terjadi pada balok dengan menggunakan aplikasi Diana FEA dapat ditunjukkan pada Gambar dibawah ini:



Gambar 11. Tegangan Maksimum pada Aplikasi Diana FEA dengan Kuat Tekan Beton Beton $f'_c = 22.00$ MPa
(Sumber: Hasil Pengujian, 2022)



Gambar 12. Tegangan Maksimum pada Aplikasi Diana FEA dengan Kuat Tekan Beton Beton $f'_c = 28.00$ MPa
(Sumber: Hasil Pengujian, 2022)



(Sumber: Hasil Pengujian, 2022)
Gambar 13. Tegangan Maksimum pada Aplikasi Diana FEA dengan Kuat Tekan Beton Beton $f'_c = 30.20$ MPa
(Sumber: Hasil Pengujian, 2022)

5. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan teoritis dan eksperimen pada balok beton bertulang rangkap dengan agregat normal, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dari hasil perhitungan secara teoritis dan eksperimen pada balok beton bertulang rangkap terjadi selisih momen retak (M_{cr}) pada setiap variasi kuat tekan beton yang digunakan yaitu pada $f'_c = 22.00$ MPa sebesar 22 %, $f'_c = 28.00$ MPa sebesar 28 % dan $f'_c = 30.20$ MPa sebesar 26 %. Dari hasil perbandingan tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa nilai momen retak (M_{cr}) hasil eksperimen lebih besar dibandingkan hasil perhitungan teoritis.
2. Pola retak yang terjadi pada keseluruhan benda uji adalah retak lentur, hal ini ditunjukkan dengan arah retakan vertikal terhadap sumbu utama balok, dan terjadi didaerah 1/2 bentang pada balok. Namun pada saat 80 % $P_{ultimate}$ terjadi retak geser yang cenderung horizontal menuju arah tumpuan dan beban. Presentase jumlah retakan meningkat setiap variasi kuat tekan beton yang digunakan yaitu pada f'_c

= 22.00 MPa sebesar 27 %, pada $f'_c = 28.00$ MPa sebesar 35 % dan $f'_c = 30.20$ MPa sebesar 38 %.

3. Pola retak hasil eksperimen dan validasi Diana menunjukkan kesamaan yang ditunjukkan dengan pola retak Diana dan eksperimen terdapat retakan pada zona yang sama.

B. Saran

Berikut saran-saran yang dapat diberikan, antara lain:

1. Pembuatan benda uji sangat menentukan ketepatan hasil penelitian, sehingga harus diperhatikan dari segi kualitas, perawatan maupun mobilitas benda uji.
2. Pada pemasangan sampai dengan pengecoran *strain gauge* diusahakan selalu dikontrol sehingga dapat berfungsi dengan baik.
3. Perlu diadakan penelitian lanjutan dengan menggunakan variasi pada ukuran atau jumlah tulangan.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318, 1995, Building Code Requirements for Structural Concrete, 5420 Old Orchard Road, Skokie, Illinois, Portland Cement Association.
- Dipohusodo, Istimawan., 1994, Struktur Beton Bertulang, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Muhtar, M. Pola Retak Balok Beton Bertulang Bambu Menggunakan Tulangan Ganda dengan Penguatan Pada Tulangan Tarik. J. Eng. Res. Teknologi.2020, I13, 608-612.
- Nawy, E. G., 1995, Reinforced Concrete A Fundamental Approach, 3rd edition, Prentice Hall, New Jersey.
- Nawy, G. Edward., 1990. Beton Bertulang (suatu Pendekatan Dasar)., PT. Eresco, Bandung.
- Tjokrodimulyo, Kardiyono., 1992. Teknologi Beton. Biro Penerbit, Yogyakarta.
- Nasution, Amrinsyah. 2009. Analisis dan Desain Struktur Beton Bertulang. Penerbit ITB. Bandung
- Departemen Pekerjaan Umum, 1990. Spesifikasi Bahan Tambah Untuk Beton SK. SNI S -18-1990-03. Bandung: Yayasan LPMB.
- Eka Putri P., 2018, Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Variasi

Overlapping Tulangan di Seperdua Bentangan dengan Metode Retrofit Menggunakan Wiremesh dan SCC.

Christian, Sukadi J. H., 2000, Retak Lentur Pada Beton Mutu Tinggi.

Dady, Y. T., Sumajouw, M. D., & Windah, R. S. (2015). Pengaruh Kuat Tekan Terhadap Kuat Lentur Balok Beton Bertulang. *Jurnal Sipil Statik*, 3(5).

Hutahaean, B. (2019). Analisis Pola Retak pada Balok Struktural dengan Slag Cement.

Badan Standarisasi Nasional, 2011, Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder. (SNI 1974-2011), Jakarta.

Badan Standarisasi Nasional, 1996, Metode Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Balok Uji Sederhana yang Dibebani Terpusat Langsung. (SNI 03-4154-1996), Jakarta.

