

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian yang direncanakan terhadap *mix design* yang telah ditentukan diantaranya adalah pengujian parameter fisik, pengujian beton segar, dan pengujian beton keras. Pengujian beton segar dilakukan dengan melakukan pengujian *filling ability*, sedangkan untuk pengujian beton keras dilakukan pengujian kuat lentur beton dan lendutan dengan waktu pengujiannya pada umur 28 hari. Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil dan pembahasan terhadap penelitian yang dilakukan dan hasil yang akan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik.

4.1 Benda Uji

Pada penelitian ini, benda uji yang utama adalah balok. Untuk benda uji silinder hanya diperlukan untuk mendapatkan kuat tekan aktual dari benda uji balok. Berikut spesifikasi dari kedua benda uji tersebut.

a) Balok

Benda uji balok pada penelitian ini memiliki tinggi 12 cm, lebar 8 cm, dan panjang bentang 135 cm. Bentang bersih dari tumpuan ke tumpuan 120 cm. Tebal selimut beton dari balok sebesar 1.5 cm. Dan memiliki tulangan 2-Ø8. Untuk proses perawatan balok dilakukan dengan cara menutup permukaan balok dengan karung goni yang telah dibasahi dengan air, namun karung goni yang basah hanya bertahan selama satu hari, oleh karena itu dilakukan penyiraman secara rutin untuk menjaga agar karung goni tetap basah. Proses perawatan seperti ini dilakukan karena ukuran balok terlampaui panjang sehingga tidak ada bak yang dapat menampung balok untuk direndam. Setelah proses perawatan selesai, balok diuji lentur pada umur 28 hari. Dengan skema pengujian yang telah dijelaskan pada Bab III.

b) Silinder

Benda uji silinder memiliki tinggi 30 cm dan diameter 15 cm. Untuk mendapatkan nilai kuat tekan aktual dari setiap variasi balok dibuat tiga buah silinder. Setelah proses pengecoran dan pelepasan bekisting selesai, proses perawatan yang dilakukan adalah dengan merendam silinder pada kolam air. Setelah proses perawatan selesai, pengujian kuat tekan pada umur 28 hari dapat dilakukan.

4.1.1 Pemeriksaan material bahan SCC

a) Pemeriksaan gradasi besar agregat halus

Agregat halus yang digunakan berasal dari Lumajang dan termasuk dalam zona gradasi 1, yaitu pasir dengan kategori kasar. Untuk grafik zona gradasi 1 dapat dilihat pada Lampiran 1.

b) Pemeriksaan gradasi besar agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan berasal dari Tebo dan termasuk dalam zona gradasi agregat kasar ukuran maksimum 15 mm. Untuk zona gradasi agregat kasar dapat dilihat pada Lampiran 1.

c) Pemeriksaan kadar air agregat halus

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kadar air rata-rata sebesar 0,422%. Untuk perhitungan kadar air agregat halus dapat dilihat pada Lampiran 1.

d) Pemeriksaan kadar air agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kadar air rata-rata sebesar 4,375%. Untuk perhitungan kadar air agregat kasar dapat dilihat pada Lampiran 1.

e) Pemeriksaan berat isi agregat halus

Berat isi agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini diketahui dengan cara *rodded* dan *shoveled*, dengan hasil masing-masing pengujian adalah 0,539 (*rodded*) dan 0,461 (*shoveled*). Untuk detail pengujian dapat dilihat pada Lampiran 1.

f) Pemeriksaan berat isi agregat kasar

Berat isi agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini diketahui dengan cara *rodded* dan *shoveled*, dengan hasil masing-masing pengujian adalah 0,524 (*rodded*) dan 0,476 (*shoveled*). Untuk detail pengujian dapat dilihat pada Lampiran 1.

g) Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan agregat halus

Agregat halus yang digunakan memiliki berat jenis kering permukaan jenuh sebesar 2,652 dan penyerapan sebesar 3,050%. Untuk detail perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 1.

h) Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan memiliki berat jenis kering permukaan jenuh sebesar 2,513 dan penyerapan sebesar 0,406%. Untuk detail perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 1.

4.2 Pengujian Sifat Fisik Beton Segar

4.2.1 Beton normal

4.2.1.1 Pengujian *slump*

Pengujian *slump* adalah pengujian penurunan pada pusat permukaan atas beton yang diukur segera setelah cetakan uji *slump* diangkat. Cara pengujian ini merupakan suatu teknik untuk memantau homogenitas dan workability adukan beton segar dengan kekentalan tertentu yang dinyatakan dengan suatu nilai *slump*. Pada penelitian ini, beton yang diuji *slump* hanya beton normal saja. Hasil dari uji *slump* dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian *Slump*

Variasi Campuran	Pengukuran Tinggi <i>Slump</i> (cm)		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Beton Normal	12,3	12,7	12,5



Gambar 4.1 Pengujian *slump* beton

Hasil pengujian *slump* didapat nilai *slump* rata-rata beton sebesar 12,5 cm. Nilai tersebut sesuai dengan yang direncanakan yaitu memenuhi nilai *slump* antara 60-180 mm.

4.2.2 Uji kriteria *self compacting concrete*

4.2.2.1 Pengujian *slump flow*

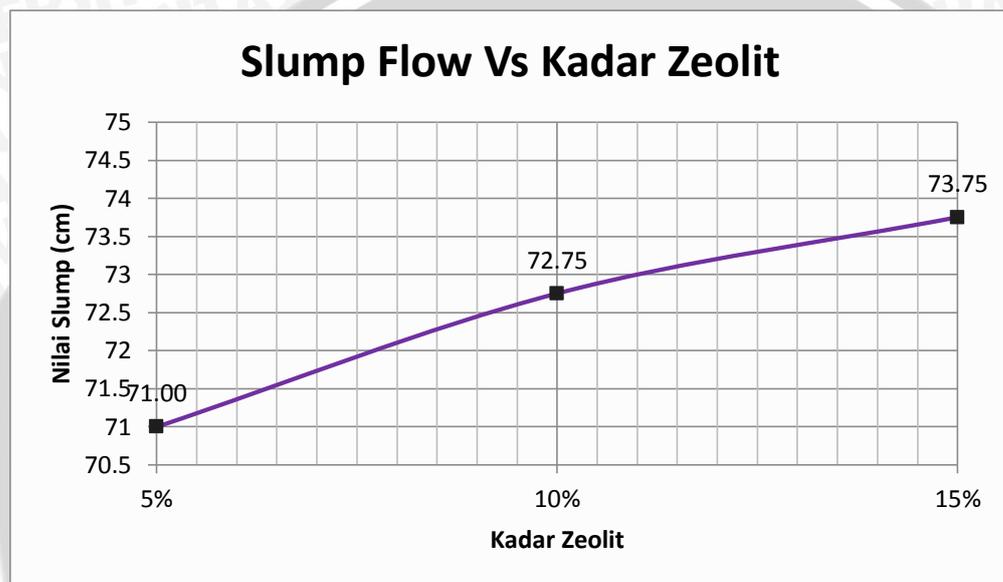
Pengujian *slump* ini berbeda dengan pengujian *slump* yang dilakukan pada beton konvensional. Pada pengujian *slump flow* ini alat yang digunakan terbalik sehingga diameter yang kecil diletakkan di bawah dan diameter yang besar diletakkan di atas.

Pada pengujian *slump flow test* ini terdapat suatu batasan dimana untuk masuk kategori SCC harus memenuhi syarat *filling ability* yang baik. Batasan dalam alat uji *slump cone test* ini, campuran beton yang dikategorikan SCC harus mampu mencapai

diameter 50 cm dalam waktu 2-5 detik setelah *cone* ditarik dan dapat mencapai 65 – 80 cm setelah 5 detik. Hasil dari pengujian *slump flow* dapat dilihat pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian *Slump Flow*

Kadar Additon Superflow	Kadar Zeolit	Diameter Slump Flow (cm)		
		Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
1,5%	5%	70.5	71.5	71.00
	10%	72.5	73	72.75
	15%	74.5	73	73.75



Gambar 4.2 Grafik hasil pengujian *slump flow*

Hasil pengujian beton segar yaitu pengujian *slump flow* dari **Gambar 4.2** didapatkan diameter berkisar 71 – 73,75 cm, sehingga *mix design* yang digunakan sudah mencakupi kriteria SCC untuk pengujian *slump flow test*.



Gambar 4.3 Pengujian *slump flow*

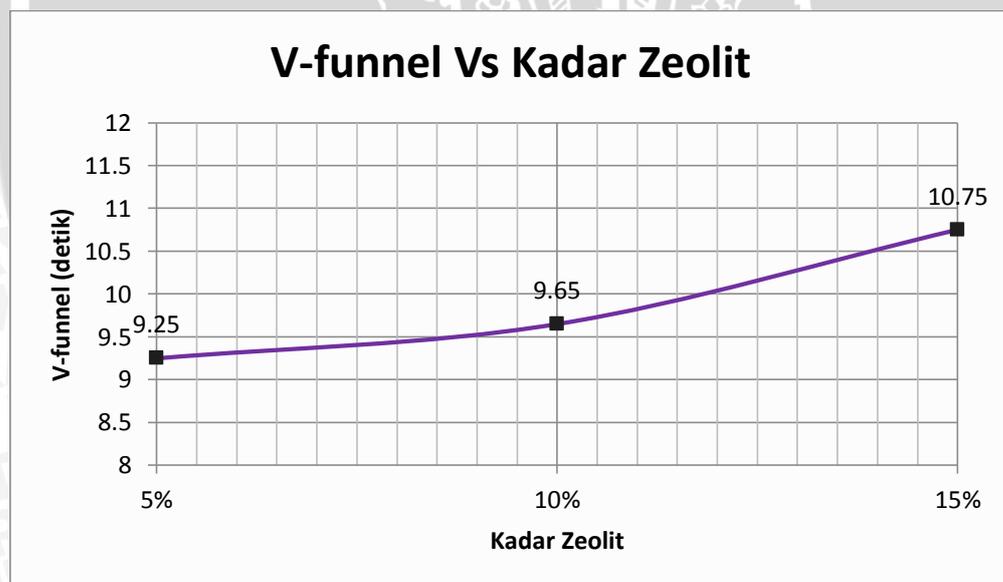
4.2.2.2 Pengujian *V-funnel*

Pengujian dengan *V-funnel* ini berguna untuk mengukur *flowability* dari campuran beton dimana kemampuan campuran beton untuk mengisi ruang dapat dilihat. Selain itu pengujian *V-funnel* ini juga dapat digunakan untuk mengetahui kemampuan campuran beton untuk menahan segregasi.

Pengujian dengan menggunakan *V-funnel* ini terdapat suatu batasan dimana untuk masuk dalam kategori SCC yang memiliki *filling ability* yang baik. Batasan dalam alat uji *V-funnel* ini adalah campuran beton yang dikategorikan SCC harus mampu mencapai waktu 8-12 detik. Hasil dari pengujian *V-funnel* dapat dilihat pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian *V-Funnel*

Kadar Additon Superflow	Kadar Zeolit	Waktu <i>V-funnel</i> (detik)		
		Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
1,5%	5%	9.2	9.3	9.25
	10%	9.8	9.5	9.65
	15%	11.3	10.2	10.75



Gambar 4.4 Grafik hasil pengujian *v-funnel*

Pada pengujian *V-funnel* dari **Gambar 4.4** berkisar 9,25 - 10,75 detik. Kriteria untuk beton SCC berkisar 8 sampai 12 detik, sehingga campuran beton yang digunakan sudah mencakupi kriteria SCC untuk uji *V-funnel*nya.



Gambar 4.5 Pengujian *v-funnel*

Pada **Gambar 4.2** dan **4.4** menunjukkan bahwa semakin besar nilai kadar zeolit alam yang diberikan, maka akan meningkatkan *filling ability* campuran karena membuat campuran menjadi lebih encer.

4.3 Pengujian Sifat Fisik Beton Keras

4.3.1 Pengujian kuat tekan aktual balok beton

Kuat tekan beton mengidentifikasi mutu dari sebuah struktur. Semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang direncanakan, semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan. Kekuatan tekan adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan per satuan luas.

Pengujian kuat tekan ini dilakukan pada umur 28 hari. Berdasarkan Peraturan Beton Bertulang Indonesia (PBBI, 1989). Besarnya kuat tekan silinder beton dapat dihitung dengan rumus :

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (4-1)$$

Dengan :

$f'c$ = kuat tekan beton pada umur tertentu (MPa)

P = beban tekan maksimum (N)

A = luas penampang benda uji (mm^2)

Contoh perhitungan : Za-1 umur 28 hari

- Luas Penampang $= (1/4) \times 3,14 \times (\text{Diameter})^2$
 $= (1/4) \times 3,14 \times (15 \text{ cm})^2$
 $= 176,625 \text{ cm}^2$
- Kuat Tekan (f^c) $= P_{\text{max}}/A$
 $= 45300 \text{ kg} / 176,625 \text{ cm}^2$
 $= 256,48 \text{ kg/cm}^2 = 25,65 \text{ Mpa}$
- Kuat Tekan rata-rata (f^{cr}) $= (25,65 \text{ Mpa} + 26,04 \text{ Mpa} + 25,99 \text{ Mpa})/3$
 $= 25,89 \text{ Mpa}$
- Standart Deviasi $= S_x = \sqrt{\frac{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}}{N-1}}$
 $= S_x = \sqrt{\frac{2011,42 - \frac{77,68^2}{3}}{3-1}}$
 $= 0,214$
- Kuat Tekan Aktual $= f^{\text{cr}} - 1,64 \times S_x$
 $= 25,89 - 1,64 \times 0,214$
 $= 25,54 \text{ Mpa}$



Gambar 4.6 Skema pengujian kuat tekan beton



Gambar 4.7 Silinder beton setelah diuji kuat tekan

Pengujian kuat tekan pada beton dilakukan pada beton yang berumur 28 hari dengan variasi campuran beton normal, beton SCC zeolit alam 5%, 10%, dan 15%. Pada pengujian kuat tekan didapatkan data profil beton yang akan diuji terlampir pada **Tabel 4.4**

Tabel 4.4 Data Profil Benda Uji Silinder

Kadar Additon Superflow	Benda Uji		Berat (kg)	Diameter (d) (cm)	Tinggi (h) (cm)	Luas Penampang (cm ²)
	Variasi Campuran	Kode				
1.50%	Beton Normal	A	11.65	15	30	176.625
		B	11.57	15	29.6	176.625
		C	11.46	15	29.8	176.625
	ZA 5%	A	11.78	15	30.1	176.625
		B	11.83	15	29.5	176.625
		C	11.76	15	30.2	176.625
	ZA 10%	A	11.62	15	29.7	176.625
		B	11.74	15	30	176.625
		C	11.83	15	30.2	176.625
ZA 15%	A	11.63	15	30.1	176.625	
	B	11.72	15	29.4	176.625	
	C	11.82	15	30	176.625	

Untuk hasil uji kuat tekan pada beton normal dan pada beton SCC variasi zeolit alam dengan umur 28 hari terlampir pada **Tabel 4.5** berikut :



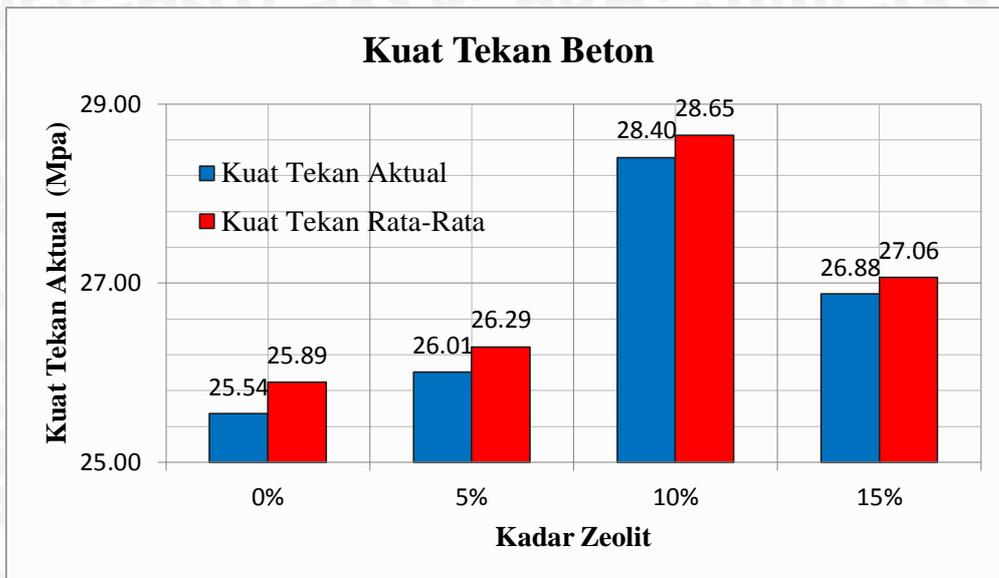
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder Beton Umur 28 Hari

Kadar Additon Superflow	Benda Uji		Hasil Uji Tekan		f'c = P/A	
	Variasi Campuran	Kode	(kN)	(kg)	kg/cm ²	Mpa
1.50%	Beton Normal	A	453	45300	256.48	25.65
		B	460	46000	260.44	26.04
		C	459	45900	259.87	25.99
			Rata-rata		258.93	25.89
	ZA 5%	A	461	46100	261.00	26.10
		B	465	46500	263.27	26.33
		C	467	46700	264.40	26.44
			Rata-rata		262.89	26.29
	ZA 10%	A	503	50300	284.78	28.48
		B	508	50800	287.62	28.76
		C	507	50700	287.05	28.70
			Rata-rata		286.48	28.65
ZA 15%	A	478	47800	270.63	27.06	
	B	480	48000	271.76	27.18	
	C	476	47600	269.50	26.95	
		Rata-rata		270.63	27.06	

Untuk mendapatkan kuat tekan aktual dari beton, tidak dapat diambil dari nilai rata-rata ketiga benda uji. Melainkan dihitung dari standart deviasi dengan rumus dan contoh perhitungan telah terlampir diatas. Berikut hasil perhitungan kuat tekan aktual untuk berbagai variasi ditampilkan pada **Tabel 4.6**

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Kuat Tekan Aktual

Kadar Additon Superflow	Kadar Zeolit	Benda Uji	Kuat Tekan Rata-Rata	Kuat Tekan Aktual	Prosentase Perbedaan
		Variasi Campuran	(Mpa)	(Mpa)	
1.50%	0%	BN	25.89	25.54	1.36%
	5%	ZA 5%	26.29	26.01	1.08%
	10%	ZA 10%	28.65	28.40	0.86%
	15%	ZA 15%	27.06	26.88	0.69%



Gambar 4.8 Grafik nilai kuat tekan aktual beton normal dan beton SCC zeolit alam

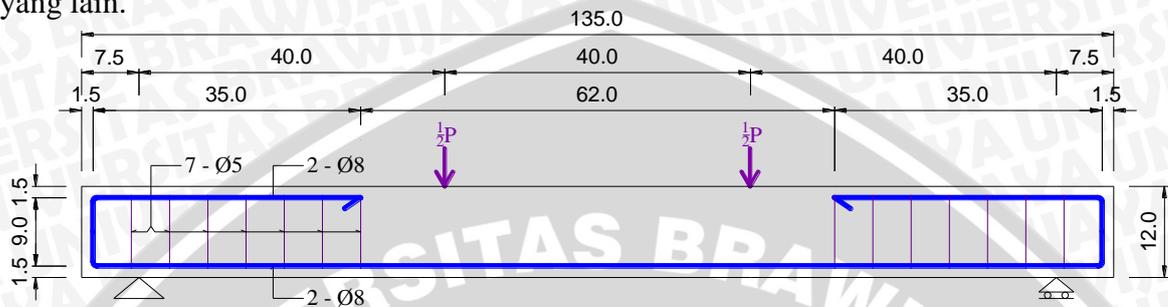
Penentuan kekuatan beton secara analitis dilakukan pada tahap *mix design* yang telah dihitung pada lampiran, yang menjadi kekuatan target minimum beton yang dihasilkan. Target minimum yang ditentukan saat perencanaan campuran sebesar 25 MPa.

Dari pengujian dan perhitungan kuat tekan pada silinder beton umur 28 hari didapat nilai kuat tekan aktual pada beton normal sebesar 25,54 Mpa. Pada beton SCC Zeolit alam kuat tekan aktual pada campuran zeolit alam 10% memiliki kuat tekan 28,40 MPa. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan campuran zeolit alam 5% sebesar 26,01 MPa dan 15% sebesar 26,88 MPa. Dengan demikian substitusi zeolit alam terhadap berat semen dengan kadar 10% akan menambah nilai kuat tekan beton SCC. Sedangkan substitusi zeolit alam terhadap berat semen dengan kadar diatas 10% akan menurunkan nilai kuat tekan beton SCC. Sehingga beton SCC zeolit alam dapat menambah kuat tekan beton namun terbatas pada 10% substitusi terhadap berat semen yang direncanakan.

Kenaikan kuat tekan beton SCC zeolit alam dibandingkan dengan beton normal disebabkan karena dalam waktu proses pengerasan beton terjadi keterlambatan dehidrasi. Sehingga air yang ada di dalam campuran diikat zeolit alam dan tidak cepat menguap. Proses pengerasan SCC dengan zeolit alam menjadi lebih baik dari beton normal karena rongga atau ruang kosong yang biasanya terdapat dalam beton yang disebabkan karena air yang ada di dalam campuran menguap, terisi oleh semen. Walaupun SCC zeolit alam memiliki waktu dehidrasi yang lebih lama dibandingkan beton normal dan membutuhkan waktu pengerasan yang lebih lama, mutu beton SCC zeolit alam lebih baik dibandingkan beton normal.

4.4 Pengaturan Benda Uji Balok Beton

Gambaran dari pengaturan dan penempatan alat ditunjukkan pada **Gambar 4.9** untuk semua jenis variasi balok beton. Semua balok didukung dengan bertumpu pada dua bagian sisinya. Salah satu sisi didukung oleh tumpuan sendi dari baja tulangan yang dibentuk bulat polos berdiameter 2 cm, sama halnya dengan tumpuan rol di bagian sisi yang lain.



Gambar 4.9 Pengaturan eksperimen benda uji lentur balok

Bentang efektif pada pengujian balok untuk semua variasi adalah 1200 mm. Pembebanan dilakukan dengan dua titik beban garis memanjang searah lebar balok. Untuk dapat membaca lendutan dipasang tiga buah *transducers* yang kemudian disebut sebagai CH1, CH2, dan CH8 dengan penempatan sesuai pada **Gambar 4.10**

Penambahan beban dilakukan teratur serta konstan dengan interval 20 kg. Kontrol beban dengan mengamati lendutan yang terjadi hanya dilakukan sampai dengan balok mengalami keruntuhan awal, namun setelah itu dilakukan pembacaan lendutan sebagai pengontrolnya dengan mengamati beban yang terjadi. Pengambilan data berhenti sampai dengan balok mengalami keruntuhan total ditunjukkan dengan penurunan drastis pada beban lentur.



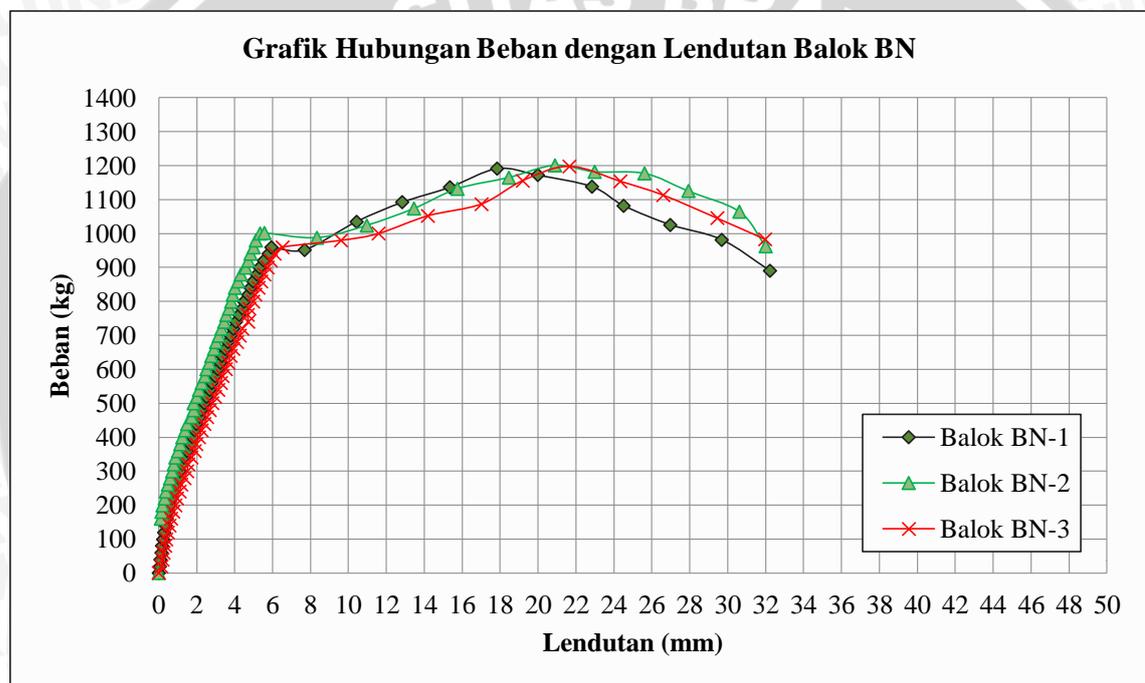
Gambar 4.10 Pemasangan aktual benda uji lentur balok

4.5 Hasil Penelitian dan Perhitungan

Pengujian lendutan dilakukan dengan pemberian beban terpusat berkala di tengah bentang balok. Dalam pelaksanaannya di Laboraturium, beban terpusat dibagi dua yaitu dalam jarak sepertiga bentang balok. Lendutan didapatkan dari pembacaan dial gauge yang dipasang di sepertiga bentang kiri, tengah bentang, dan sepertiga bentang kanan.

Nilai beban dan lendutan didapatkan dari pengujian lentur di laboratorium sedangkan momen didapatkan dari hasil perhitungan. Data ini kemudian diolah dan ditampilkan dalam bentuk grafik.

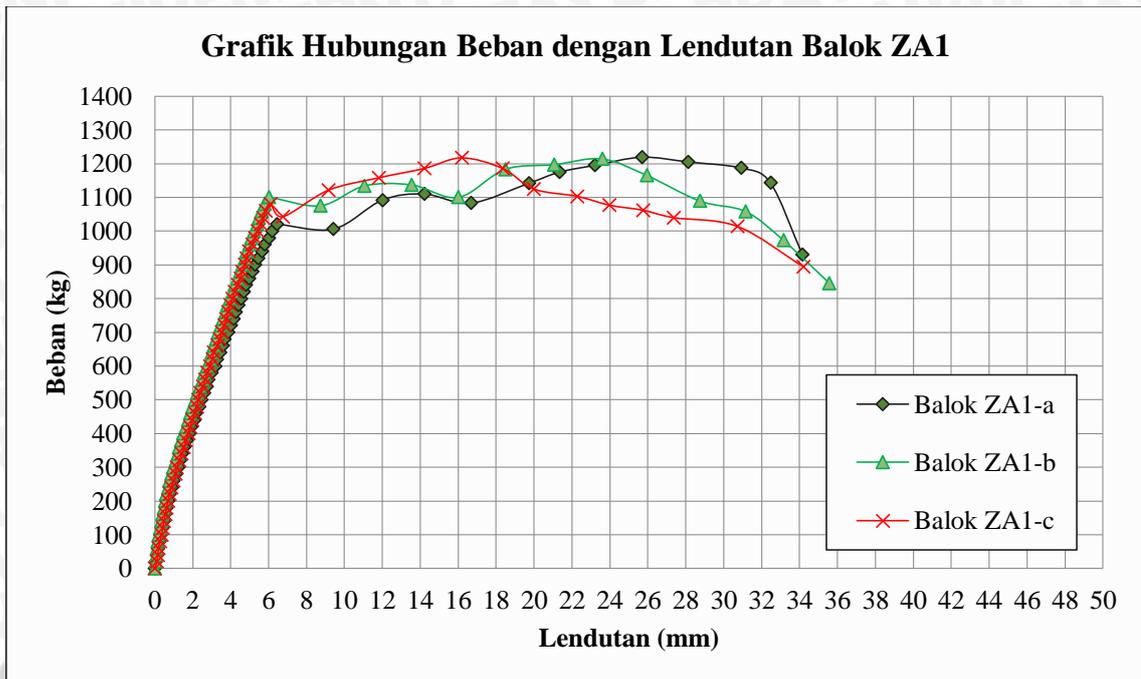
4.5.1 Hubungan beban (P) dan lendutan (Δ) balok beton normal



Gambar 4.11 Respon beban-lendutan balok beton normal (BN)

Pada **Gambar 4.11** menunjukkan nilai lendutan maksimum semakin meningkat seiring dengan bertambahnya beban. Adapun nilai beban maksimum untuk balok BN sebesar 1197 kg pada saat lendutan mencapai 20,125 mm. Bentang balok BN adalah 1200 mm sehingga diperoleh momen ultimit 239,3 kgm.

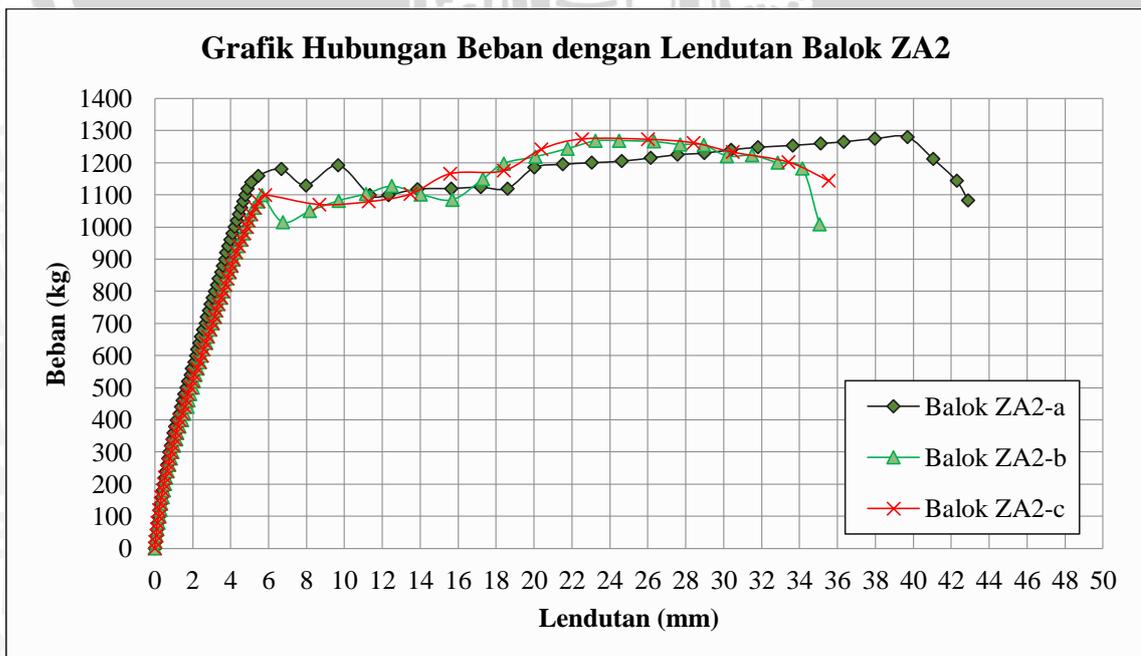
4.5.2 Hubungan beban (P) dan lendutan (Δ) balok beton SCC zeolit alam 5%



Gambar 4.12 Respon beban-lendutan balok SCC zeolit alam 5% (ZA1)

Pada **Gambar 4.12** menunjukkan nilai lendutan maksimum semakin meningkat seiring dengan bertambahnya beban. Adapun nilai beban maksimum untuk balok ZA1 sebesar 1217 kg pada saat lendutan mencapai 21,822 mm. Bentang balok ZA1 adalah 1200 mm sehingga diperoleh momen ultimit 243,3 kgm.

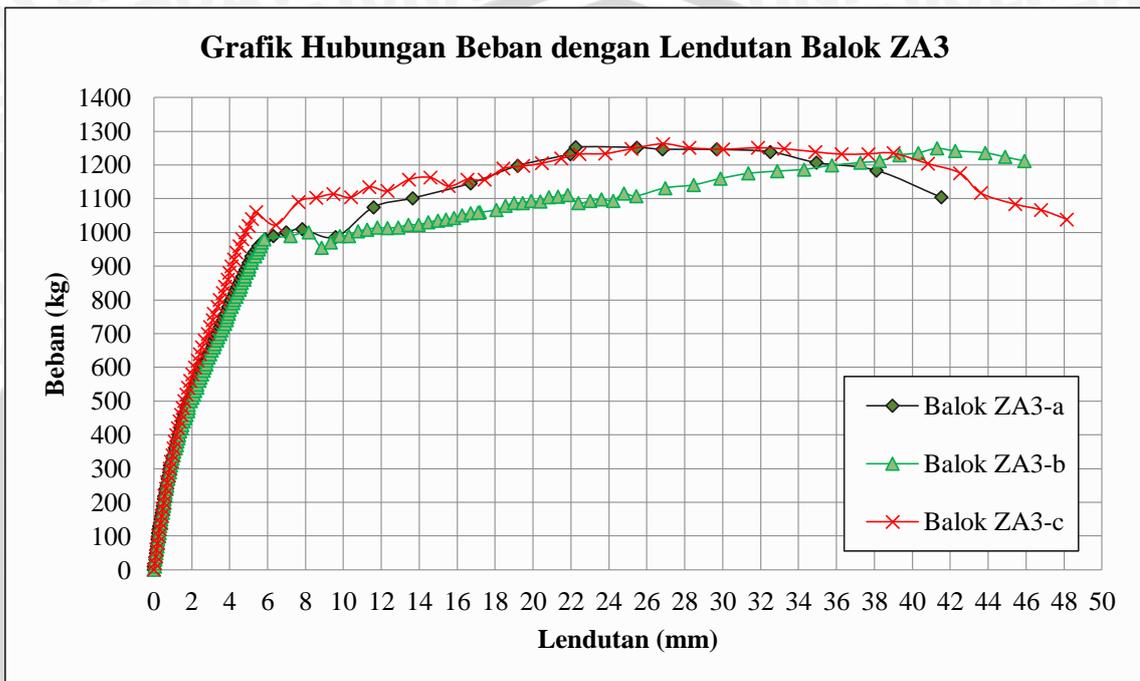
4.5.3 Hubungan beban (P) dan lendutan (Δ) balok beton SCC zeolit zlam 10%



Gambar 4.13 Respon beban-lendutan balok SCC zeolit alam 10% (ZA2)

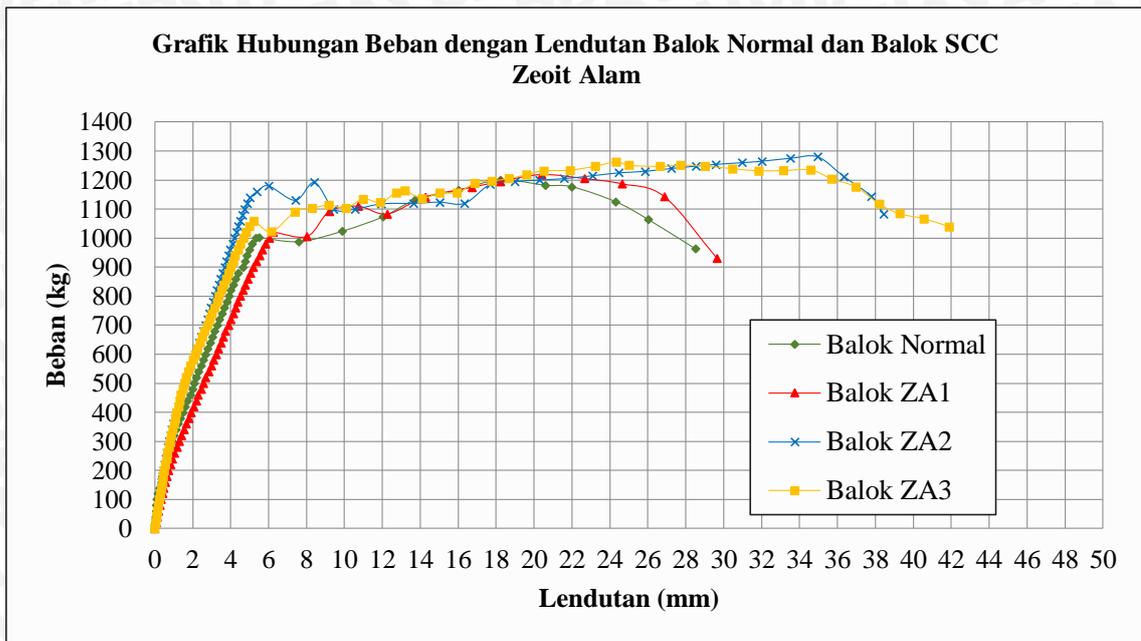
Pada **Gambar 4.13** menunjukkan nilai lendutan maksimum semakin meningkat seiring dengan bertambahnya beban. Adapun nilai beban maksimum untuk balok ZA2 sebesar 1274 kg pada saat lendutan mencapai 28,893 mm. Bentang balok ZA2 adalah 1200 mm sehingga diperoleh momen ultimit 254,9 kgm.

4.5.4 Hubungan beban (P) dan lendutan (Δ) balok beton SCC zeolit alam 15%



Gambar 4.14 Respon beban-lendutan balok SCC zeolit alam 15% (ZA3)

Pada **Gambar 4.14** menunjukkan nilai lendutan maksimum semakin meningkat seiring dengan bertambahnya beban. Adapun nilai beban maksimum untuk balok ZA3 sebesar 1255 kg pada saat rata-rata lendutan mencapai 30,127 mm. Bentang balok ZA3 adalah 1200 mm sehingga diperoleh momen ultimit 251,0 kgm.



Gambar 4.15 Respon beban-lendutan balok normal dan balok SCC zeolit alam

Dari semua hasil nilai lendutan maksimum pada tiap variasi balok, diambil masing-masing variasi satu sampel untuk diperbandingkan antara satu sama lain. Terlihat pada **Gambar 4.15** bahwa beban ultimit dengan nilai terbesar pada balok SCC zeolit alam dengan kadar 10% atau ZA2. Nilai tersebut tidak berbeda jauh dengan balok SCC zeolit alam dengan kadar 15% atau ZA3, dibuktikan dengan tren grafik yang hampir sama. Hal ini juga dipengaruhi oleh proses pengerasan balok SCC zeolit alam lebih baik daripada balok beton normal, sehingga beban ultimit yang dihasilkan juga menjadi lebih besar.

4.6 Prediksi Teoritis

Prediksi teoritis dibuat dengan menggunakan parameter kuat tekan beton ($f'c$), ditentukan dengan test di laboratorium yang besarnya dapat dilihat pada **Tabel 4.3.2**. Kuat leleh tulangan yang digunakan (f_y) sebesar 240 MPa. Dan luas tulangan tarik yang digunakan adalah 2- \varnothing 8 dengan $A_s = 1,01 \text{ cm}^2$.

Untuk memperhitungkan beban lentur ultimit yang mampu diterima oleh balok, dilakukan analisis untuk menghitung kapasitas momen pada penampang balok. Dari beban tersebut maka akan didapatkan nilai kuat lentur yang dapat dicapai oleh balok. Rumus kuat lentur dapat dilihat pada rumus (2-2) dan rumus lendutan dapat dilihat pada rumus (2-3). Sedangkan untuk perhitungan momen dipakai rumus seperti pada rumus (4-2) berikut :

$$Mu = \frac{1}{2} Pu x \frac{1}{3} L \quad (4-2)$$

Dengan :

Mu = momen ultimit (kgm)

Pu = beban ultimit (kg)

L = bentang bersih balok (m)

Perhitungan statika menyatakan bahwa beban yang diperlukan untuk mencapai kapasitas momen dan nilai kuat lentur dari keempat variasi balok tertera pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Rekapitulasi Nilai Beban Prediksi Teoritis, Kuat Lentur, dan Tipe Keruntuhan

Benda Uji	f'c	Beban Ultimit	Mn	Kuat Lentur	Tipe Keruntuhan	
Kode	Mpa	kg	kgm	kg/cm ²		
BN	1	25.65	1188.37	237.67	122.88	Patah di 1/3 bentang tengah
	2	26.04	1189.65	237.93	123.01	Patah di 1/3 bentang tengah
	3	25.99	1189.47	237.89	122.99	Patah di 1/3 bentang tengah
		25.54	1188.02	237.60	122.84	
ZA1	a	26.10	1189.83	237.97	123.03	Patah di 1/3 bentang tengah
	b	26.33	1190.55	238.11	123.10	Patah di 1/3 bentang tengah
	c	26.44	1190.90	238.18	123.14	Patah di 1/3 bentang tengah
		26.01	1189.53	237.91	123.00	
ZA2	a	28.48	1196.75	239.35	123.74	Patah di 1/3 bentang tengah
	b	28.76	1197.49	239.50	123.82	Patah di 1/3 bentang tengah
	c	28.70	1197.34	239.47	123.81	Patah di 1/3 bentang tengah
		28.40	1196.54	239.31	123.72	
ZA3	a	27.06	1192.78	238.56	123.33	Patah di 1/3 bentang tengah
	b	27.18	1193.11	238.62	123.37	Patah di 1/3 bentang tengah
	c	26.95	1192.44	238.49	123.30	Patah di 1/3 bentang tengah
		26.88	1192.23	238.45	123.28	

4.7 Pembahasan

4.7.1 Kuat lentur, lendutan, dan momen balok beton normal

Keruntuhan balok berdasarkan observasi adalah terjadinya kegagalan pada balok beton dalam menahan lentur, model ditunjukkan pada **Gambar 4.16**. Retak pertama terjadi ditengah balok tanpa mengalami kegagalan balok dalam menahan beban lentur. Retak selanjutnya tidak berbeda jauh dengan retak pertama, hanya perbedaan posisi retak. Untuk retak terbesar yang menyebabkan gagalnya balok terleak di 1/3 bentang tengah balok.



Gambar 4.16 Model retak balok beton normal

Sulit untuk mengamati terjadinya suatu retak pada balok ini. Berdasarkan pengamatan, retak besar pertama terjadi ketika beban menunjukkan pembacaan 1010 kg dan beban ultimit yang mampu ditan oleh balok adalah 1191 kg. Dilakukan analisis untuk memperoleh kuat lentur struktur balok beton normal, sehingga menghasilkan kuat lentur aktual di dalam sistem balok adalah $123,15 \text{ kg/cm}^2$. Begitu pula dengan nilai kuat lentur pada balok BN-2 adalah $124,18 \text{ kg/cm}^2$ dengan beban ultimit yang dicapai sebesar 1201 kg, dan pada balok BN-3 sebesar $123,87 \text{ kg/cm}^2$ untuk beban ultimit yang dicapai sebesar 1198 kg.

Nilai dari beban ultimit hasil eksperimen dan hasil perhitungan teoritis ditunjukkan pada **Tabel 4.7.1**. Rata-rata dapat diambil dari nilai beban hasil eksperimen yaitu sebesar 1197 kg. Sedangkan untuk rata-rata beban dari hasil perhitungan teoritis diperoleh sebesar 1189,17 kg.

Tabel 4.8 Komparasi Nilai Beban Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Beban Ultimit (kg)	Beban Ultimit (kg)	
BN-1	1188.37	1191	0.22%
BN-2	1189.65	1201	0.94%
BN-3	1189.47	1198	0.71%
Rata-rata	1189.17	1197	0.63%

Nilai dari kuat lentur hasil eksperimen dan hasil teoritis ditunjukkan pada **Tabel 4.9**. Rata-rata dapat diambil dari nilai kuat lentur hasil eksperimen yaitu sebesar $124,65$

kg/cm². Sedangkan untuk rata-rata kuat lentur dari hasil perhitungan teoritis diperoleh sebesar 123,87 kg/cm².

Tabel 4.9 Komparasi Nilai Kuat Lentur Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

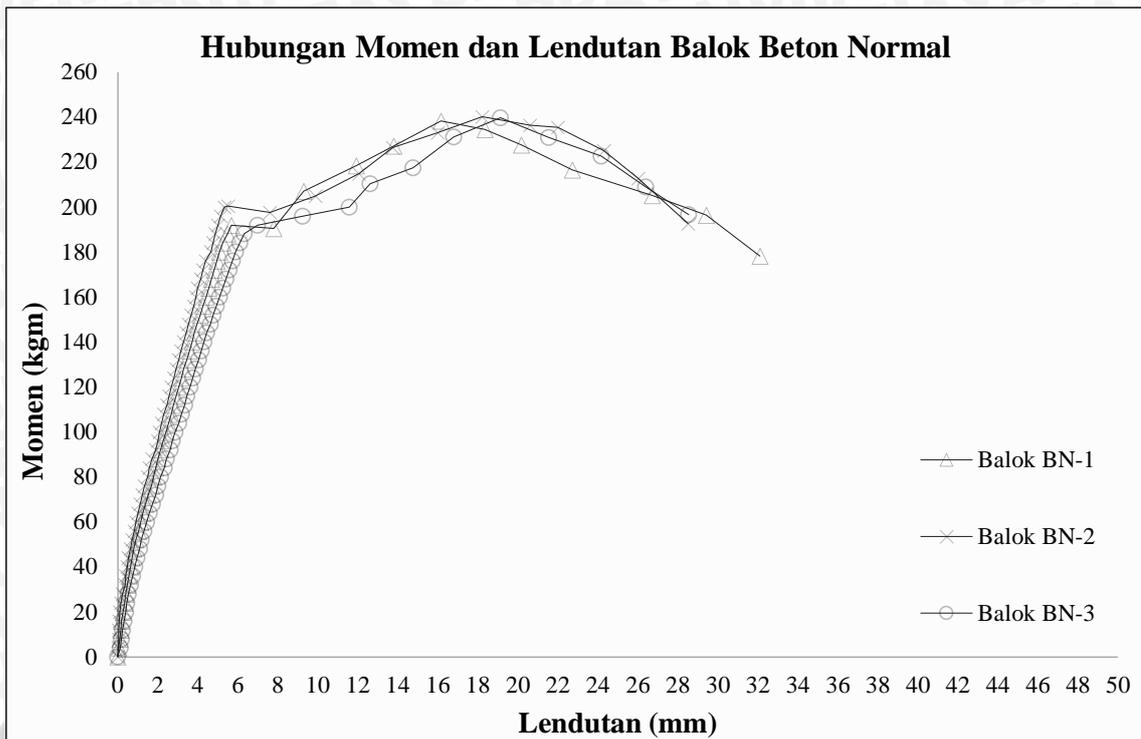
Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Kuat Lentur (kg/cm ²)	Kuat Lentur (kg/cm ²)	
BN-1	122.88	123.15	0.22%
BN-2	123.01	124.18	0.94%
BN-3	122.99	123.87	0.71%
Rata-rata	122.96	123.73	0.63%

Nilai momen yang dapat dihitung yaitu momen yang terjadi pada daerah lentur murni ketika beban ultimit telah tercapai. Daerah lentur murni adalah daerah sepertiga bagian dari bentang keseluruhan, yang terletak di tengah bentang atau yang dibatasi oleh dua titik pembebanan.

Berdasarkan beban ultimit yang dapat ditahan maka perhitungan statika dilakukan untuk mendapatkan nilai momen pada masing-masing balok. Dihasilkan untuk balok BN-1 momen ultimit adalah 238,2 kgm, BN-2 momen ultimit adalah 240,2 kgm, dan BN-3 momen ultimit adalah 239,6 kgm. Dengan nilai rata-rata dari momen ultimit hasil eksperimen sebesar 239,33 kgm. Sedangkan nilai rata-rata dari momen ultimit hasil perhitungan teoritis sebesar 237,83 kgm. Seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.10**.

Tabel 4.10 Komparasi Nilai Momen Ultimit Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Momen Ultimit (kgm)	Momen Ultimit (kgm)	
BN-1	237.67	238.20	0.22%
BN-2	237.93	240.20	0.94%
BN-3	237.89	239.60	0.71%
Rata-rata	237.83	239.33	0.63%



Gambar 4.17 Kurva momen-deformasi Balok BN

Pada **Gambar 4.17** merupakan gabungan dari kurva momen dan lendutan dari ketiga sampel balok BN. Pada saat pembebanan balok pada fase elastis, ketiga kurva dapat diamati saling berhimpit. Sehingga nilai lendutan pada saat beban yang menyebabkan perubahan dari fase elastis ke plastis tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Balok BN-1 memiliki lendutan sebesar 5,920 mm, balok BN-2 sebesar 5,575 mm, dan balok BN-3 sebesar 6,110 mm. Dan lendutan ketika momen ultimit untuk balok BN-1 sebesar 17,845 mm, balok BN-2 sebesar 20,880 mm, dan balok BN-3 sebesar 21,650 mm.

4.7.2 Kuat lentur, lendutan, dan momen Balok SCC Zeolit Alam

Keruntuhan balok berdasarkan observasi adalah terjadinya kegagalan pada balok beton dalam menahan lentur, model ditunjukkan pada **Gambar 4.18**. Retak pertama terjadi ditengah balok tanpa mengalami kegagalan balok dalam menahan beban lentur. Retak selanjutnya tidak berbeda jauh dengan retak pertama, hanya perbedaan posisi retak. Untuk retak terbesar yang menyebabkan gagalnya balok terleak di 1/3 bentang tengah balok.



Gambar 4.18 Model retak balok SCC zeolit alam

4.7.2.1 Balok SCC zeolit alam 5%

Berdasarkan pengamatan, retak besar pertama terjadi ketika beban menunjukkan pembacaan 1020 kg dan beban ultimit yang mampu dithan oleh balok adalah 1219 kg. Dilakukan analisis untuk memperoleh kuat lentur struktur balok beton normal, sehingga menghasilkan kuat lentur aktual di dalam sistem balok adalah $126,04 \text{ kg/cm}^2$. Begitu pula dengan nilai kuat lentur pada balok ZA1-b adalah $125,53 \text{ kg/cm}^2$ dengan beban ultimit yang dicapai sebesar 1214 kg, dan pada balok ZA1-c sebesar $125,84 \text{ kg/cm}^2$ untuk beban ultimit yang dicapai sebesar 1217 kg.

Nilai dari beban ultimit hasil eksperimen dan hasil perhitungan teoritis ditunjukkan pada **Tabel 4.11**. Rata-rata dapat diambil dari nilai beban hasil eksperimen yaitu sebesar 1217 kg. Sedangkan untuk rata-rata beban dari hasil perhitungan teoritis diperoleh sebesar 1190,43 kg.

Tabel 4.11 Komparasi Nilai Beban Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Beban Ultimit (kg)	Beban Ultimit (kg)	
ZA1-a	1189.83	1219	2.39%
ZA1-b	1190.55	1214	1.93%
ZA1-c	1190.90	1217	2.14%
Rata-rata	1190.43	1217	2.16%

Nilai dari kuat lentur hasil eksperimen dan hasil teoritis ditunjukkan pada **Tabel 4.12**. Rata-rata dapat diambil dari nilai kuat lentur hasil eksperimen yaitu sebesar 125,80 kg/cm². Sedangkan untuk rata-rata kuat lentur dari hasil perhitungan teoritis diperoleh sebesar 123,09 kg/cm².

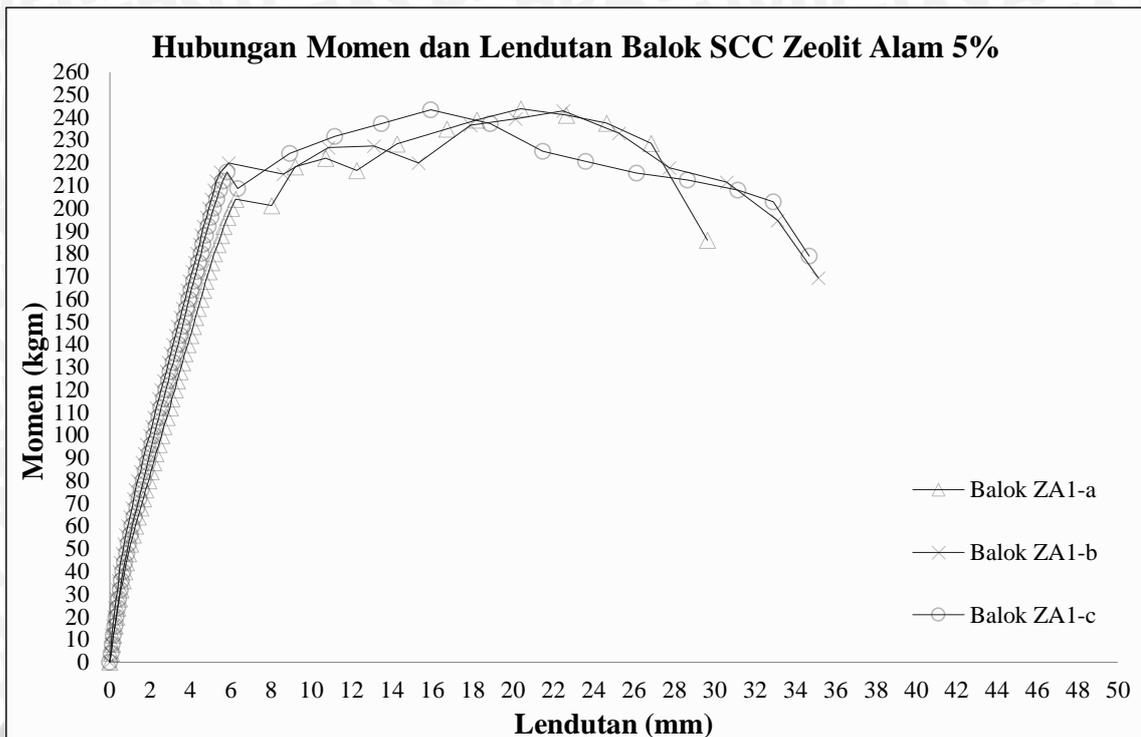
Tabel 4.12 Komparasi Nilai Kuat Lentur Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Kuat Lentur (kg/cm ²)	Kuat Lentur (kg/cm ²)	
ZA1-a	123.03	126.04	2.39%
ZA1-b	123.10	125.53	1.93%
ZA1-c	123.14	125.84	2.14%
Rata-rata	123.09	125.80	2.16%

Berdasarkan beban ultimit yang dapat ditahan maka perhitungan statika dilakukan untuk mendapatkan nilai momen pada masing-masing balok. Dihasilkan untuk balok ZA1-a momen ultimit adalah 243,8 kgm, ZA1-b momen ultimit adalah 242,8 kgm, dan ZA1-c momen ultimit adalah 243,4 kgm. Dengan nilai rata-rata dari momen ultimit hasil eksperimen sebesar 243,33 kgm. Sedangkan nilai rata-rata dari momen ultimit hasil perhitungan teoritis sebesar 238,09 kgm. Seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.13**.

Tabel 4.13 Komparasi Nilai Momen Ultimit Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Momen Ultimit (kgm)	Momen Ultimit (kgm)	
ZA1-a	237.97	243.80	2.39%
ZA1-b	238.11	242.80	1.93%
ZA1-c	238.18	243.40	2.14%
Rata-rata	238.09	243.33	2.16%



Gambar 4.19 Kurva momen-deformasi di tengah bentang Balok ZA1

Pada **Gambar 4.19** merupakan gabungan dari kurva momen dan lendutan dari ketiga sampel balok ZA1. Pada saat pembebanan balok pada fase elastis, ketiga kurva dapat diamati saling berhimpit. Sehingga nilai lendutan pada saat beban yang menyebabkan perubahan dari fase elastis ke plastis tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Balok ZA1-a memiliki lendutan sebesar 6,445 mm, balok ZA1-b sebesar 6,020 mm, dan balok ZA1-c sebesar 6,095 mm. Dan lendutan ketika momen ultimit untuk balok ZA1-a sebesar 25,690 mm, balok ZA1-b sebesar 23,590 mm, dan balok ZA1-c sebesar 16,185 mm.

4.7.2.2 Balok SCC zeolit alam 10%

Berdasarkan pengamatan, retak besar pertama terjadi ketika beban menunjukkan pembacaan 1180 kg dan beban ultimit yang mampu dithan oleh balok adalah 1280 kg. Dilakukan analisis untuk memperoleh kuat lentur struktur balok beton normal, sehingga menghasilkan kuat lentur aktual di dalam sistem balok adalah 132,35 kg/cm². Begitu pula dengan nilai kuat lentur pada balok ZA2-b adalah 131,21 kg/cm² dengan beban ultimit yang dicapai sebesar 1269 kg, dan pada balok ZA2-c sebesar 131,73 kg/cm² untuk beban ultimit yang dicapai sebesar 1274 kg.

Nilai dari beban ultimit hasil eksperimen dan hasil perhitungan teoritis ditunjukkan pada **Tabel 4.14**. Rata-rata dapat diambil dari nilai beban hasil eksperimen

yaitu sebesar 1274 kg. Sedangkan untuk rata-rata beban dari hasil perhitungan teoritis diperoleh sebesar 1197,19 kg.

Tabel 4.14 Komparasi Nilai Beban Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Beban Ultimit (kg)	Beban Ultimit (kg)	
ZA2-a	1196.75	1280	6.50%
ZA2-b	1197.49	1269	5.63%
ZA2-c	1197.34	1274	6.02%
Rata-rata	1197.19	1274	6.05%

Nilai dari kuat lentur hasil eksperimen dan hasil teoritis ditunjukkan pada **Tabel 4.15**. Rata-rata dapat diambil dari nilai kuat lentur hasil eksperimen yaitu sebesar 131,77 kg/cm². Sedangkan untuk rata-rata kuat lentur dari hasil perhitungan teoritis diperoleh sebesar 123,79 kg/cm².

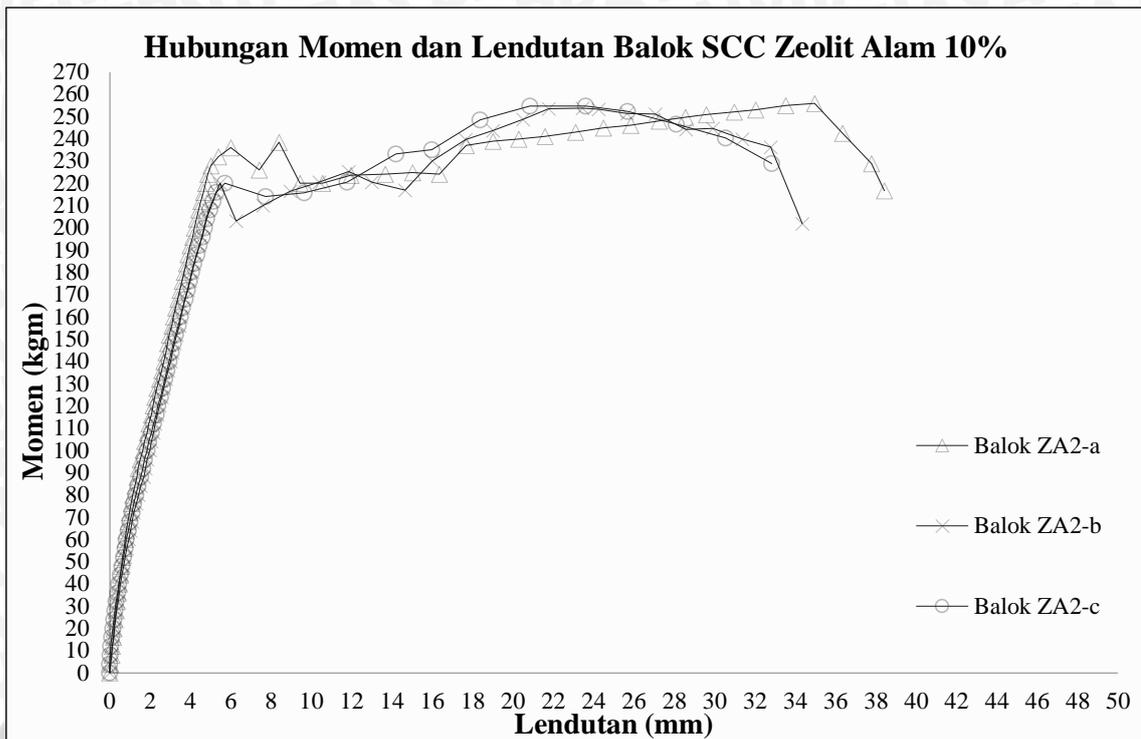
Tabel 4.15 Komparasi Nilai Kuat Lentur Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Kuat Lentur (kg/cm ²)	Kuat Lentur (kg/cm ²)	
ZA2-a	123.74	132.35	6.50%
ZA2-b	123.82	131.21	5.63%
ZA2-c	123.81	131.73	6.02%
Rata-rata	123.79	131.77	6.05%

Berdasarkan beban ultimit yang dapat ditahan maka perhitungan statika dilakukan untuk mendapatkan nilai momen pada masing-masing balok. Dihasilkan untuk balok ZA2-a momen ultimit adalah 256,00 kgm, ZA2-b momen ultimit adalah 253,80 kgm, dan ZA2-c momen ultimit adalah 254,80 kgm. Dengan nilai rata-rata dari momen ultimit hasil eksperimen sebesar 254,87 kgm. Sedangkan nilai rata-rata dari momen ultimit hasil perhitungan teoritis sebesar 239,44 kgm. Seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.16**.

Tabel 4.16 Komparasi Nilai Momen Ultimit Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Momen Ultimit (kgm)	Momen Ultimit (kgm)	
ZA2-a	239.35	256.00	6.50%
ZA2-b	239.50	253.80	5.63%
ZA2-c	239.47	254.80	6.02%
Rata-rata	239.44	254.87	6.05%



Gambar 4.20 Kurva momen-deformasi di tengah bentang Balok ZA2

Pada **Gambar 4.20** merupakan gabungan dari kurva momen dan lendutan dari ketiga sampel balok ZA2. Pada saat pembebanan balok pada fase elastis, ketiga kurva dapat diamati saling berhimpit. Sehingga nilai lendutan pada saat beban yang menyebabkan perubahan dari fase elastis ke plastis tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Balok ZA2-a memiliki lendutan sebesar 6,655 mm, balok ZA2-b sebesar 5,660 mm, dan balok ZA2-c sebesar 5,805 mm. Dan lendutan ketika momen ultimit untuk balok ZA2-a sebesar 39,675 mm, balok ZA2-b sebesar 24,470 mm, dan balok ZA2-c sebesar 22,535 mm.

4.7.2.3 Balok SCC zeolit alam 15%

Berdasarkan pengamatan, retak besar pertama terjadi ketika beban menunjukkan pembacaan 1010 kg dan beban ultimit yang mampu dithan oleh balok adalah 1253 kg. Dilakukan analisis untuk memperoleh kuat lentur struktur balok beton normal, sehingga menghasilkan kuat lentur aktual di dalam sistem balok adalah $129,56 \text{ kg/cm}^2$. Begitu pula dengan nilai kuat lentur pada balok ZA3-b adalah $129,15 \text{ kg/cm}^2$ dengan beban ultimit yang dicapai sebesar 1249 kg, dan pada balok ZA3-c sebesar $130,59 \text{ kg/cm}^2$ untuk beban ultimit yang dicapai sebesar 1263 kg.

Nilai dari beban ultimit hasil eksperimen dan hasil perhitungan teoritis ditunjukkan pada **Tabel 4.17**. Rata-rata dapat diambil dari nilai beban hasil eksperimen

yaitu sebesar 1255 kg. Sedangkan untuk rata-rata beban dari hasil perhitungan teoritis diperoleh sebesar 1192,78 kg.

Tabel 4.17 Komparasi Nilai Beban Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Beban Ultimit (kg)	Beban Ultimit (kg)	
ZA3-a	1192.78	1253	4.81%
ZA3-b	1193.11	1249	4.47%
ZA3-c	1192.44	1263	5.59%
Rata-rata	1192.78	1255	4.96%

Nilai dari kuat lentur hasil eksperimen dan hasil teoritis ditunjukkan pada **Tabel 4.18**. Rata-rata dapat diambil dari nilai kuat lentur hasil eksperimen yaitu sebesar 129,77 kg/cm². Sedangkan untuk rata-rata kuat lentur dari hasil perhitungan teoritis diperoleh sebesar 123,33 kg/cm².

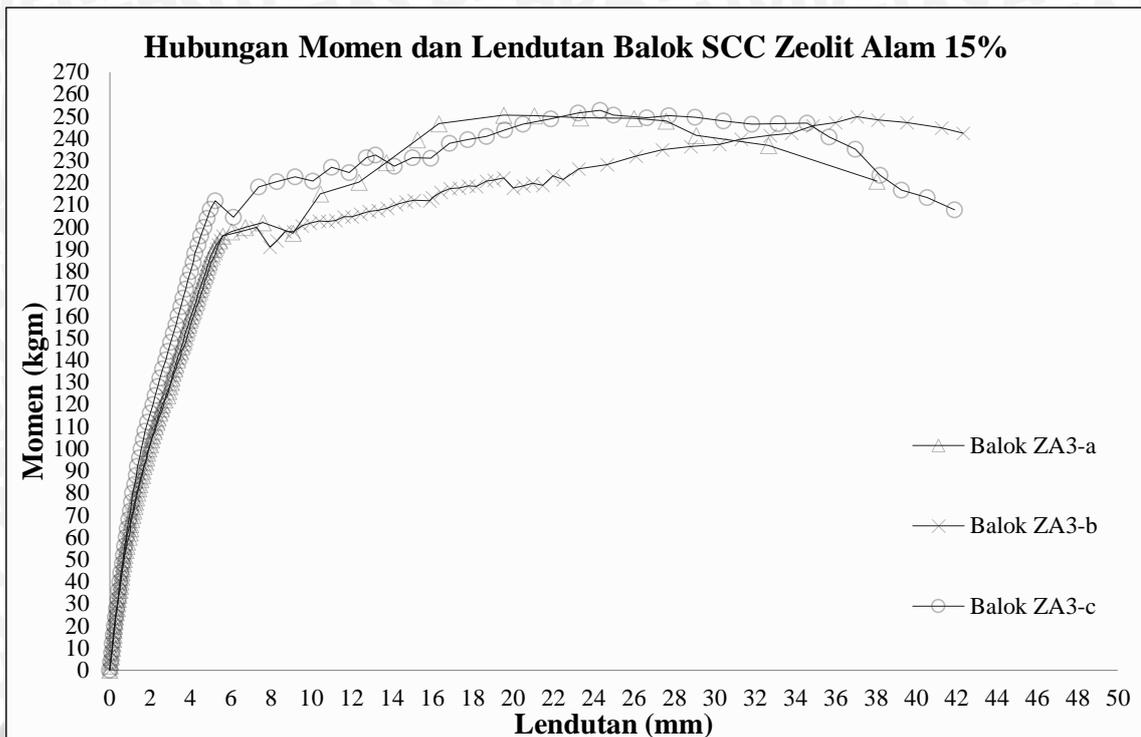
Tabel 4.18 Komparasi Nilai Kuat Lentur Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Kuat Lentur (kg/cm ²)	Kuat Lentur (kg/cm ²)	
ZA3-a	123.33	129.56	4.81%
ZA3-b	123.37	129.15	4.47%
ZA3-c	123.30	130.59	5.59%
Rata-rata	123.33	129.77	4.96%

Berdasarkan beban ultimit yang dapat ditahan maka perhitungan statika dilakukan untuk mendapatkan nilai momen pada masing-masing balok. Dihasilkan untuk balok ZA3-a momen ultimit adalah 250,60 kgm, ZA3-b momen ultimit adalah 249,80 kgm, dan ZA3-c momen ultimit adalah 252,60 kgm. Dengan nilai rata-rata dari momen ultimit hasil eksperimen sebesar 252,60 kgm. Sedangkan nilai rata-rata dari momen ultimit hasil perhitungan teoritis sebesar 238,49 kgm. Seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.19**

Tabel 4.19 Komparasi Nilai Momen Ultimit Prediksi Teoritis dan Hasil Eksperimen

Balok	Teoritis	Eksperimen	Prosentase Perbedaan
	Momen Ultimit (kgm)	Momen Ultimit (kgm)	
ZA3-a	238.56	250.60	4.81%
ZA3-b	238.62	249.80	4.47%
ZA3-c	238.49	252.60	5.59%
Rata-rata	238.56	251.00	4.96%



Gambar 4.21 Kurva momen-deformasi di tengah bentang Balok ZA3

Pada **Gambar 4.21** merupakan gabungan dari kurva momen dan lendutan dari ketiga sampel balok ZA3. Pada saat pembebanan balok pada fase elastis, ketiga kurva dapat diamati saling berhimpit. Sehingga nilai lendutan pada saat beban yang menyebabkan perubahan dari fase elastis ke plastis tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Balok ZA3-a memiliki lendutan sebesar 7,820 mm, balok ZA3-b sebesar 8,175 mm, dan balok ZA3-c sebesar 5,390 mm. Dan lendutan ketika momen ultimit untuk balok ZA3-a sebesar 22,240 mm, balok ZA3-b sebesar 41,285 mm, dan balok ZA3-c sebesar 26,855 mm.

Dilihat dari semua beban ultimit, kuat lentur, dan momen ultimit yang dihasilkan dari eksperimen memiliki nilai yang lebih besar daripada hasil perhitungan teoritis. Untuk balok beton normal rata-rata perbedaan untuk eksperimen dan teoritis hanya sebesar 0,63% dan balok SCC zeolit alam 5% rata-rata perbedaan untuk eksperimen dan teoritis sebesar 2,16%. Berbeda dengan balok SCC zeolit alam 10% dan 15% yang memiliki rata-rata perbedaan lebih dari sama dengan 5%. Ini dikarenakan kadar zeolit 10% merupakan prosentase maksimum untuk meningkatkan kuat tekan balok sehingga prosentase perbedaan yang dihasilkan lebih besar daripada balok beton normal dan balok SCC zeolit alam 5%.

4.7.3 Rekapitulasi nilai kuat lentur, lendutan, dan momen

4.7.3.1 Balok beton normal

Tabel 4.20 berisikan hasil penelitian berikut nilai kuat lentur, momen, dan lendutan di dalamnya. Retak besar pertama balok BN ditandai dengan perubahan simpangan grafik beban-lendutan. Perubahan lendutan daerah elastis bergeser pada daerah plastis.

Tabel 4.20 Rekapitulasi Hasil Penelitian Balok Beton Normal

Benda Uji	Beban Ultimit	Momen Ultimit	Kuat Lentur	Lendutan Ultimit
Kode	kg	kgm	kg/cm ²	mm
BN	1	1191	238.2	17.845
	2	1201	240.2	20.880
	3	1198	239.6	21.650
Rata-rata	1197	239.3	123.73	20.125

Dari rekapitulasi hasil penelitian balok normal didapatkan nilai rata-rata untuk perbandingan terhadap balok SCC zeolit alam, yang berisikan beban ultimit rata-rata sebesar 1196,7 kg, kuat lentur rata-rata sebesar 747,92 kg/cm², momen ultimit rata-rata sebesar 239,33 kgm, dan lendutan ultimit rata-rata sebesar 29,727 mm.

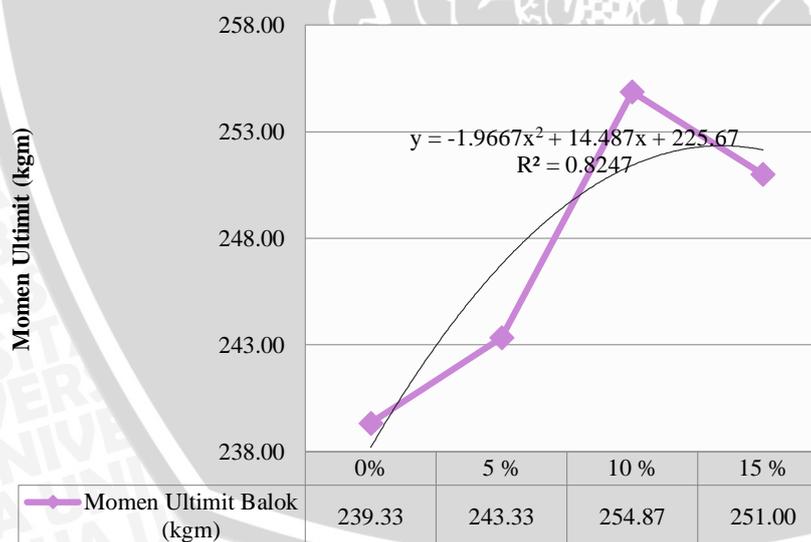
4.7.3.2 Balok SCC zeolit alam

Tabel 4.21 berisikan hasil penelitian berikut nilai kuat lentur, momen dan lendutan di dalamnya. Dari masing-masing variasi balok SCC zeolit alam diambil nilai rata-rata dari semua hasil analisis yang berisikan beban ultimit, kuat lentur, momen, dan lendutan.

Tabel 4.21 Rekapitulasi Hasil Penelitian Balok SCC Zeolit Alam

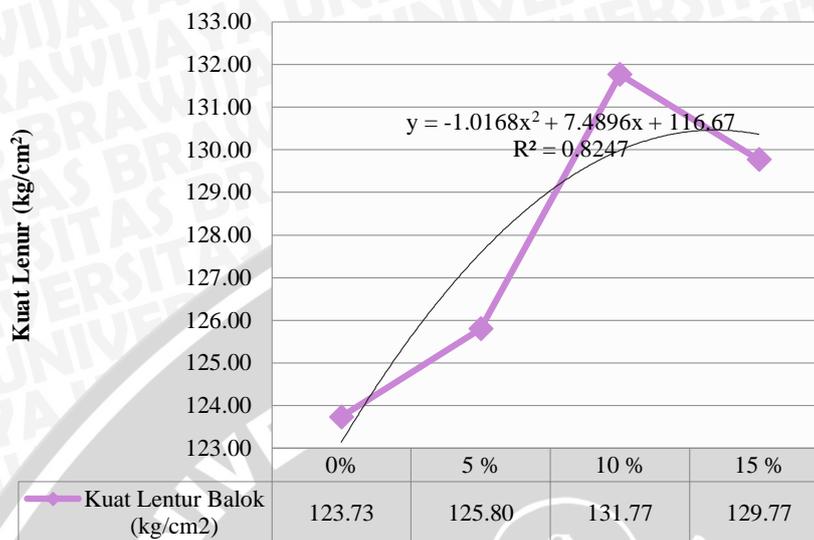
Benda Uji	Beban Ultimit	Momen Ultimit	Kuat Lentur	Lendutan Ultimit	
Kode	kg	kgm	kg/cm ²	mm	
ZA1	a	1219	243.8	126.04	25.690
	b	1214	242.8	125.53	23.590
	c	1217	243.4	125.84	16.185
Rata-rata	1217	243.3	125.80	21.822	
ZA2	a	1280	256.0	132.35	39.675
	b	1269	253.8	131.21	24.470
	c	1274	254.8	131.73	22.535
Rata-rata	1274	254.9	131.77	28.893	
ZA3	a	1253	250.6	129.56	22.240
	b	1249	249.8	129.15	41.285
	c	1263	252.6	130.59	26.855
Rata-rata	1255	251.0	129.77	30.127	

Komponen yang ditinjau dalam penelitian ini adalah kuat lentur dalam satuan kg/cm², momen ultimit yang diperoleh dari beban ultimit dalam satuan kgm, lendutan diambil dari nilai lendutan pada saat balok mengalami retak besar pertama, dan lendutan ultimit pada saat balok mengalami keruntuhan.

**Gambar 4.22** Momen ultimit balok beton normal dan SCC zeolit alam di tengah bentang

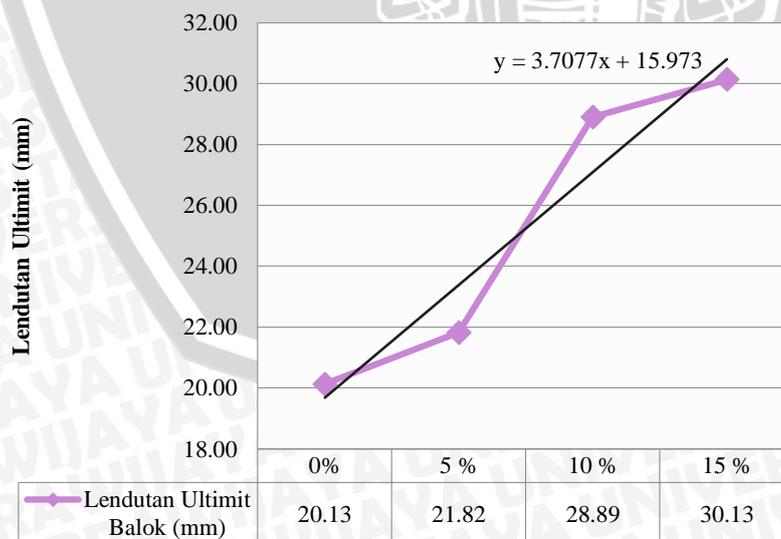
Jika ditinjau dari hasil regresi hubungan momen ultimit rata-rata dengan prosentase kadar zeolit alam menyatakan bahwa dapat terlihat hubungan persamaan yang terbentuk antara penambahan variasi zeolit alam dengan momen ultimit balok beton. Nilai optimum yang didapat dari persamaan regresi $y = -1,9667x^2 + 14,487x + 225,67$ adalah

sebesar 13,8%. Prosentase tersebut akan dapat memberikan nilai momen ultimit optimum dibandingkan variasi lainnya.



Gambar 4.23 Kuat lentur balok beton normal dan SCC zeolit alam

Jika ditinjau dari hasil regresi hubungan kuat lentur rata-rata dengan prosentase kadar zeolit alam menyatakan bahwa dapat terlihat hubungan persamaan yang terbentuk antara penambahan variasi zeolit alam dengan kuat lentur balok beton. Nilai optimum yang didapat dari persamaan regresi $y = -1,0168x^2 + 7,4896x + 116,67$ adalah sebesar 13,8%. Prosentase tersebut akan dapat memberikan nilai kuat lentur optimum dibandingkan variasi lainnya.



Gambar 4.24 Lendutan ultimit balok beton normal dan SCC zeolit alam

4.7.4 Hubungan kuat lentur , lendutan ultimit, dan momen ultimit

Dilihat dari **Gambar 4.22** dan **Gambar 4.23** yang telah disajikan diatas, dapat dilihat bahwa kuat lentur dan momen ultimit yang dihasilkan oleh balok SCC zeolit alam dengan kadar zeolit 10%, memiliki nilai paling besar dibandingkan dengan balok SCC zeolit alam dengan kadar zeolit 5% dan 15%. Jika dilihat dari nilai regresi polinomial momen ultimit dan kuat lentur pada **Gambar 4.22** dan **Gambar 4.23** nilai momen ultimit dan kuat lentur mengalami tren naik dan mencapai nilai puncak pada kadar zeolit 13,8%, kemudian turun setelah mencapai nilai puncak. Sehingga semakin banyak kadar zeolit yang diberikan maka kuat lentur dan lendutan ultimit yang dihasilkan juga semakin besar, akan tetapi terbatas pada kadar 10% saja, lebih dari kadar tersebut maka kuat lentur dan momen yang dihasilkan oleh balok akan mengalami penurunan.

Lain halnya dengan lendutan ultimit, dilihat dari nilai regresi linier lendutan ultimit pada **Gambar 4.24** nilai lendutan mengalami tren naik yang cukup signifikan. Hal ini terjadi karena semakin banyak zeolit alam yang diberikan maka nilai lendutan yang dihasilkan semakin besar.

Kondisi daktilitas ialah ketika beton mampu menahan beban karena masih mampu berdeformasi dan itu terjadi pada kondisi plastis. Beban yang dipikul dan lendutan yang lebih besar ini artinya balok SCC zeolit alam dengan kadar zeolit alam 10% mempunyai daktilitas yang lebih tinggi. Dengan kekakuan yang besar daktilitas mampu dicapai pada nilai yang besar oleh balok SCC zeolit alam 10%. Berbeda dengan balok beton normal yang memiliki kekakuan dan daktilitas yang lebih rendah. Seperti terlihat pada **Tabel 4.22** berikut.

Tabel 4.22 Nilai Daktilitas dan Kekakuan Balok

Benda Uji	Daktilitas	Kekakuan
Kode		kg/mm
BN	4.820	153.846
ZA1	5.041	177.194
ZA2	6.122	189.492
ZA3	5.310	129.156

Ini membuktikan bahwa prosentase optimum zeolit alam yang dapat menggantikan sebagian jumlah semen adalah sebesar 10%. Dan juga dapat dilihat bahwa balok SCC zeolit alam dengan kadar zeolit 10% memiliki nilai kuat lentur hampir 6,5% lebih besar daripada balok beton normal.

4.7.5 Pengujian hipotesis pengaruh variasi kadar zeolit alam terhadap nilai kuat lentur dan lendutan balok SCC zeolit alam

a. Kuat lentur

Pengujian hipotesis ini digunakan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC terhadap kuat lentur balok. Pengujian hipotesis yang dilakukan adalah analisis varian satu arah.

Pernyataan ada atau tidaknya pengaruh tersebut secara statistic dapat dinyatakan dengan :

α = Pengaruh penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC terhadap kuat lentur balok.

Sedangkan hipotesis statistiknya adalah sebagai berikut :

$$H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \dots = \alpha_n$$

$$H_1 = \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \dots \neq \alpha_n$$

Dimana :

H_0 = Hipotesis awal yang menyatakan bahwa tidak ada pengaruh penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC terhadap kuat lentur balok.

H_1 = Hipotesis alternatif yang menyatakan ada pengaruh penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC terhadap kuat lentur balok.

Pada analisis varian satu arah ini digunakan taraf signifikan (α) sebesar 5%, dimana tingkat signifikan 5% atau 0,05 artinya mengambil resiko salah dalam mengambil keputusan untuk menolak hipotesis yang benar sebanyak-banyaknya 5% dan benar dalam mengambil keputusan sedikitnya 95% (tingkat kepercayaan). Perhitungan analisis varian satu arah secara lengkap dapat dilihat di lampiran.

Tabel 4.23 Analisis Varian Satu Arah Kuat Lentur

Sumber Varian (SV)	JK	db	KT	F hitung	F Tabel
Antar (A)	55.26	2	27.63	87.44	3.24 (5%)
Dalam (D)	1.90	6	0.32		
Total (T)	57.16	8			

Dari hasil analisis varian satu arah ini didapat $F_{hitung} > F_{tabel}$. Hal ini menunjukkan bahwa H_0 ditolak dan H_1 diterima, yang artinya bahwa penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai kuat lentur balok SCC zeolit alam.

b. Lendutan

Pengujian hipotesis ini digunakan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC terhadap lendutan balok. Pengujian hipotesis yang dilakukan adalah analisis varian satu arah.

Pernyataan ada atau tidaknya pengaruh tersebut secara statistic dapat dinyatakan dengan :

α = Pengaruh penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC terhadap lendutan balok.

Sedangkan hipotesis statistiknya adalah sebagai berikut :

$$H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \dots = \alpha_n$$

$$H_1 = \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \dots \neq \alpha_n$$

Dimana :

H_0 = Hipotesis awal yang menyatakan bahwa tidak ada pengaruh penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC terhadap lendutan balok.

H_1 = Hipotesis alternatif yang menyatakan ada pengaruh penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC terhadap lendutan balok.

Pada analisis varian satu arah ini digunakan taraf signifikan (α) sebesar 5%, dimana tingkat signifikan 5% atau 0,05 artinya mengambil resiko salah dalam mengambil keputusan untuk menolak hipotesis yang benar sebanyak-banyaknya 5% dan benar dalam mengambil keputusan sedikitnya 95% (tingkat kepercayaan). Perhitungan analisis varian satu arah secara lengkap dapat dilihat di lampiran.

Tabel 4.24 Analisis Varian Satu Arah Lendutan

Sumber Varian (SV)	JK	db	KT	F hitung	F Tabel
Antar (A)	120.50	2	60.25	0.85	3.24 (5%)
Dalam (D)	423.51	6	70.59		
Total (T)	544.02	8			

Dari hasil analisis varian satu arah ini didapat $F_{hitung} < F_{tabel}$. Hal ini menunjukkan bahwa H_0 diterima dan H_1 ditolak, yang artinya bahwa penggunaan variasi kadar zeolit alam pada balok SCC tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai lendutan balok SCC zeolit alam.

4.7.6 Perbandingan nilai kuat lentur dan lendutan ultimit balok beton normal dengan Balok SCC zeolit alam 10%

Tabel 4.25 berisikan hasil rekapitulasi nilai kuat lentur dan lendutan ultimit dari balok beton normal dan balok SCC zeolit alam 10%. Dari kedua nilai tersebut terlihat secara jelas dan dapat dibandingkan antara balok beton normal dan balok SCC zeolit alam 10% antara satu sama lain.

Tabel 4.25 Rekapitulasi Nilai Kuat Lentur dan Lendutan Ultimit Balok Beton Normal dan Balok SCC Zeolit Alam

Benda Uji Kode	Kuat Lentur kg/cm ²	Prosentase Kenaikan	Lendutan Ultimit mm	Prosentase Kenaikan
BN	123.73	-	20.125	-
ZA2	131.77	6.49%	28.893	43.57%

Dilihat dari **Tabel 4.25** nilai kuat lentur dan lendutan yang dihasilkan oleh balok beton normal dan balok SCC zeolit alam 10% memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Prosentase kenaikan untuk kuat lentur mencapai 6,5% dan lendutan ultimit mencapai 43.57%. Hal ini disebabkan oleh proses pengerasan pada scc zeolit alam lebih baik daripada beton normal sehingga kuat lentur yang dihasilkan menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan beton normal. Dan lendutan yang tinggi pada balok SCC zeolit alam dikarenakan waktu pengerasan yang lebih lama dibandingkan dengan beton normal, sehingga prosentase perbedaan yang dihasilkan cukup besar.

Dapat diartikan bahwa substitusi zeolit alam sebanyak 10% terhadap berat semen mampu menaikkan nilai kuat lentur pada balok, akan tetapi juga menambah besarnya lendutan yang terjadi. Ini dikarenakan balok SCC zeolit alam dengan kadar 10% memiliki daktilitas yang lebih besar daripada balok beton normal. Sehingga lendutan yang dihasilkan juga semakin besar akan tetapi mampu menahan beban yang lebih besar juga.

Lendutan yang besar pada balok SCC zeolit alam dapat diantisipasi dengan memperbesar nilai inersia balok. Karena dengan inersia yang lebih besar maka nilai lendutan dapat diperkecil. Sedangkan untuk pembatasan ukuran agregat pada persyaratan perencanaan SCC yang berpengaruh pada nilai kuat geser, diantisipasi dengan perkuatan tulangan pada daerah tumpuan dan sengkang yang lebih rapat, sehingga balok SCC zeolit alam tidak mengalami keruntuhan geser.

4.8 Pola Retak Balok

Model keruntuhan suatu struktur dapat dilihat dari pola retak yang terjadi. Semua benda uji balok memiliki pola retak yang sama, diawali dengan retak yang terjadi pada daerah tengah bentang atau daerah lentur murni disusul dengan munculnya retak pada daerah tepi bentang, ditunjukkan pada **Tabel 4.26**.

Tabel 4.26 Pola Retak Balok

Balok	Pola retak
BN	
ZA1	
ZA2	
ZA3	

Daktilitas balok diperoleh dari pengamatan respon beban dan didapati bahwa lentur yang terjadi mampu menghasilkan daktilitas balok yang cukup baik. Ditunjukkan dengan balok yang mampu menahan beban sampai menghasilkan lendutan yang cukup besar. Didukung pula dengan dibutuhkanannya nilai tegangan yang besar untuk mengakibatkan balok hancur dalam menahan gaya tekan pada daerah balok bagian atas. Balok memiliki tulangan yang berfungsi sebagai perkuatan ketika balok tersebut mengalami tegangan tarik. Tulangan juga mampu berfungsi sebagai perkuatan geser sehingga balok mampu untuk tidak mengalami keruntuhan geser pada saat beban besar diberikan.