

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

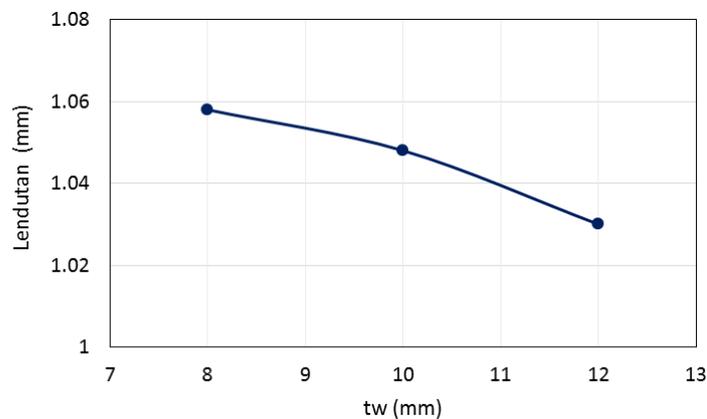
2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian ini perlu melakukan peninjauan terhadap berbagai penelitian-penelitian terkait yang pernah dilakukan sebelumnya guna mendapatkan referensi yang sesuai dengan penelitian yang akan dilakukan. Berikut merupakan penelitian terdahulu berupa beberapa jurnal terkait dengan penelitian yang akan dilakukan penulis.

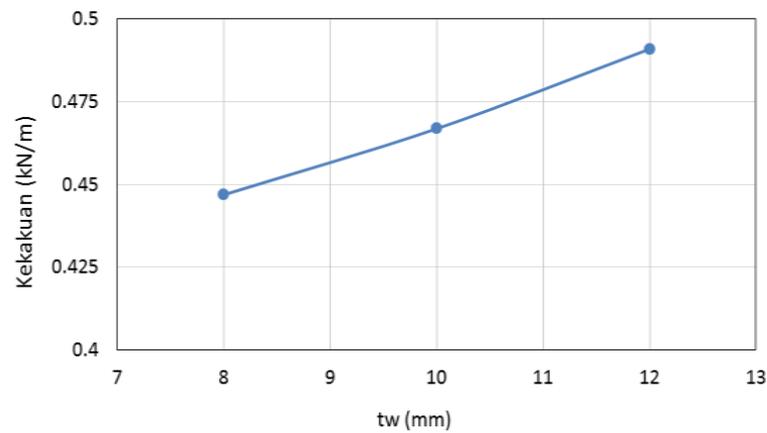
1. Pengaruh Variasi Tebal Terhadap Kekuatan Lentur pada Balok Komposit Menggunakan *Response-2000* (Cahyati, 2016).
2. Kajian Efisiensi *Bulb-Tee Shape And Half Slab Girder* dengan *Blister* Tunggal Terhadap *PC-I Girder* (Leo dan Agung, 2017).
3. Perbandingan Daktilitas Balok Beton Bertulang dengan Menggunakan Perkuatan *CFRP* dan *GFRP* (Nurlina dkk., 2016).
4. Efektifitas *Wire Rope* Sebagai Perkuatan pada Daerah Momen Negatif Balok Beton Bertulang Tampang T (Haryanto, 2011).
5. Perilaku Lentur pada Keadaan Layan dan Batas Balok Beton Bertulang Berlubang Memanjang (Amir dkk., 2011).
6. Analisa Pengaruh Penambahan Tulangan Tekan Terhadap Daktilitas Kurvatur Balok Beton Bertulang (Nur, 2009).
7. Pengaruh Campuran Kadar *Bottom Ash* dan Lama Peredam Air Laut Terhadap Kuat Tekan, Lendutan, Kapasitas Lentur, Kuat Geser dan Pola Retak Balok (Syamsuddin dkk., 2015).
8. Analisis Kuat Lentur Murni Sistem Balok Bataton Semi Pracetak (Putra dkk, 2017).
9. Analisa Perbandingan Kelayakan pada Gelagar Jembatan dengan Menggunakan Precast U dan I (Lubis dan Karolina, 2017).
10. Analisis Lentur Balok Penampang T Berlubang Memanjang Menggunakan Metode Elemen Hingga Non-linier (Sukarno dan Sulisty, 2011).

2.1.1. *Response-2000*

Cahyati (2016) mengkaji kekuatan lentur struktur balok komposit baja IWF yang diselimuti oleh beton dengan variasi tebal badan pada penampang IWF. Metode penelitian pada tahap awal dimulai dengan melakukan studi literatur. Selanjutnya dilakukan pemodelan pada *software Response-2000*. Dengan menggunakan *software* tersebut maka akan didapatkan data berupa kapasitas momen penampang dan *curvature*. Kemudian dilakukan pembahasan mengenai hubungan variasi ketebalan penampang pada *web* dengan nilai kapasitas momen lentur balok. Benda uji yang dimodelkan terbuat dari material beton dan baja IWF 200x200. Material beton memiliki kuat tekan sebesar 20 MPa dan modulus elastisitas sebesar 21019,04 MPa. Berdasarkan analisis *software Response 2000* didapat nilai kapasitas momen lentur benda uji A sebesar 236,40 kNm, benda uji B sebesar 244,63 kNm, dan benda uji C sebesar 252,83 kNm. Rata-rata peningkatan momen balok komposit dengan ketebalan 8 mm, 10 mm, dan 12 mm sebesar 3,3%.



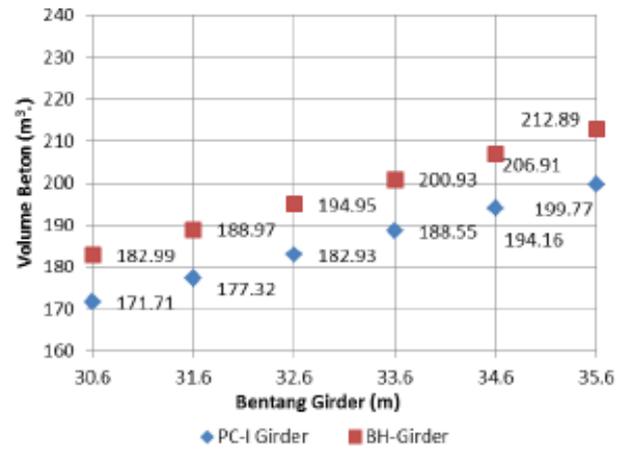
Gambar 2. 1 Hubungan lendutan maksimal dengan variasi ketebalan web (tw) (Cahyati, 2016).



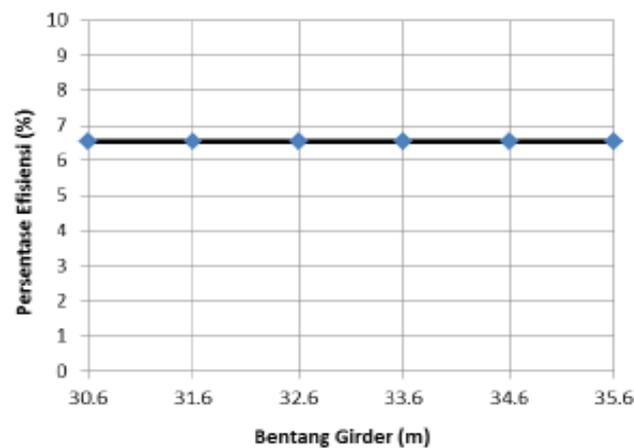
Gambar 2.2 Hubungan nilai kekakuan balok terhadap variasi ketebalan *web* (tw) (Cahyati, 2016).

2.1.2. Balok Girder

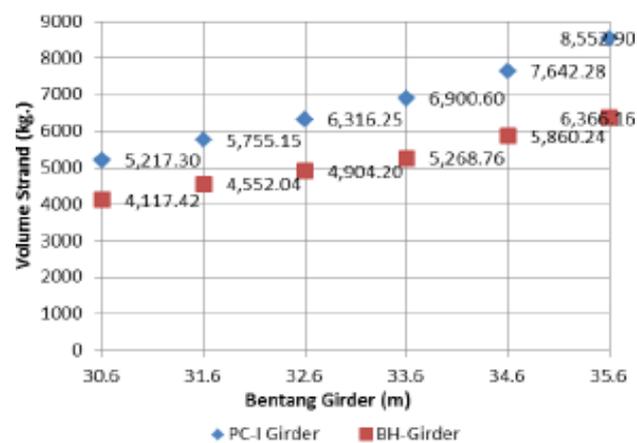
Leo dan Agung (2017) akan membandingkan salah satu sistem girder prategang yang dinamakan sistem BH girder (*Bulb-Tee shape* and *Half-slab girder*) yang telah dikembangkan negara Korea dengan gelagar I (PC-I girder) yang umumnya digunakan di Indonesia. Pada penelitian ini merencanakan sampel jembatan simple span di atas dua tumpuan sederhana dengan lebar jembatan ± 9.00 meter. Untuk jembatan dengan gelagar I (PC-I girder) dan BH-girder. Dari hasil perhitungan, volume beton yang diperlukan BH-girder lebih besar dibandingkan volume beton yang diperlukan oleh PC-I girder per jembatan untuk balok gelagar dengan tinggi yang sama. Persentase inefisiensi tersebut cenderung konstan (tetap) untuk bentang girder dari 30,60 meter sampai dengan 35,60 meter. Berdasarkan hasil perhitungan, berat strand yang diperlukan BH-girder lebih kecil dibandingkan berat strand yang diperlukan oleh PC-I girder per jembatan untuk balok gelagar dengan tinggi yang sama. Persentase efisiensi tersebut cenderung meningkat sebanding dengan bentang girder dari 30,60 meter sampai dengan 35,60 meter. Tegangan lentur dapat dilihat bahwa tegangan pada BH girder dengan blister tunggal lebih optimal dibandingkan tegangan yang terjadi pada PC-I girder, kesimpulan dengan tinggi gelagar yang sama, sistem BH girder dengan blister tunggal lebih efisien dari segi tegangan dan volume strand.



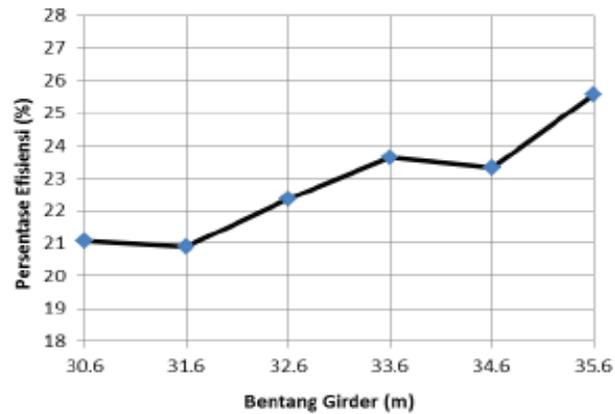
Gambar 2.3 Perbandingan volume beton tiap jembatan (Leo dan Agung, 2017).



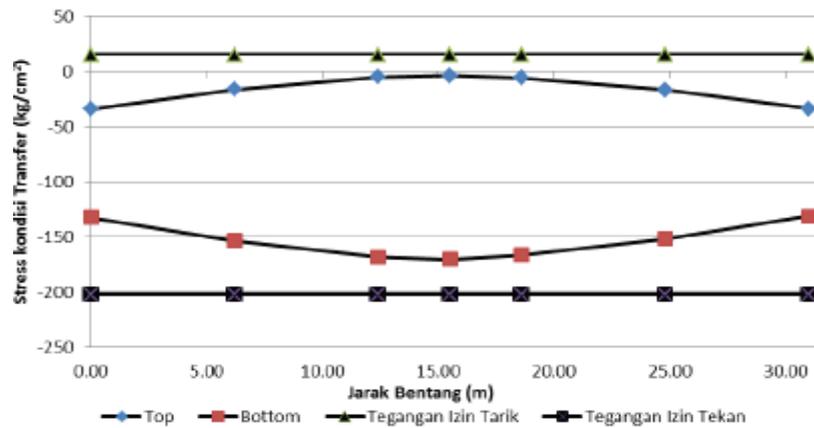
Gambar 2.4 Persentase inefisiensi volume beton BH girder terhadap PC-I girder (Leo dan Agung, 2017).



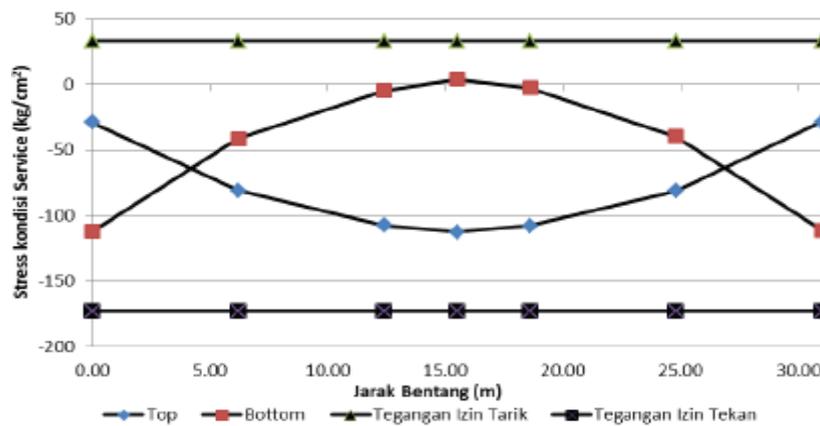
Gambar 2.5 Perbandingan berat *strand* tiap jembatan (Leo dan Agung, 2017).



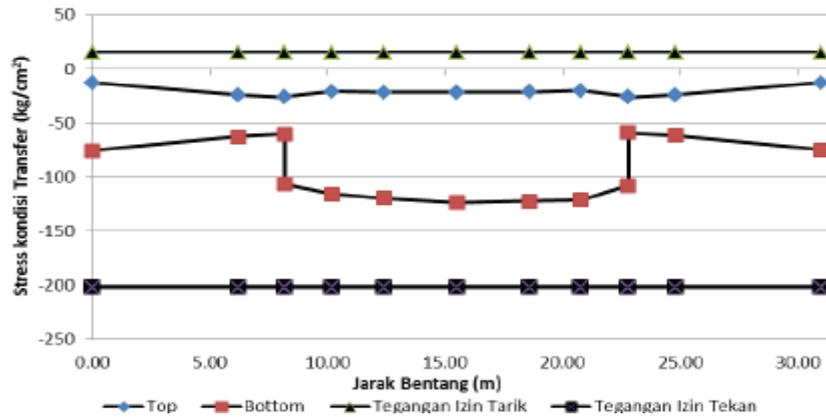
Gambar 2.6 Persentase efisiensi berat strand BH girder terhadap PC-I girder (Leo dan Agung, 2017).



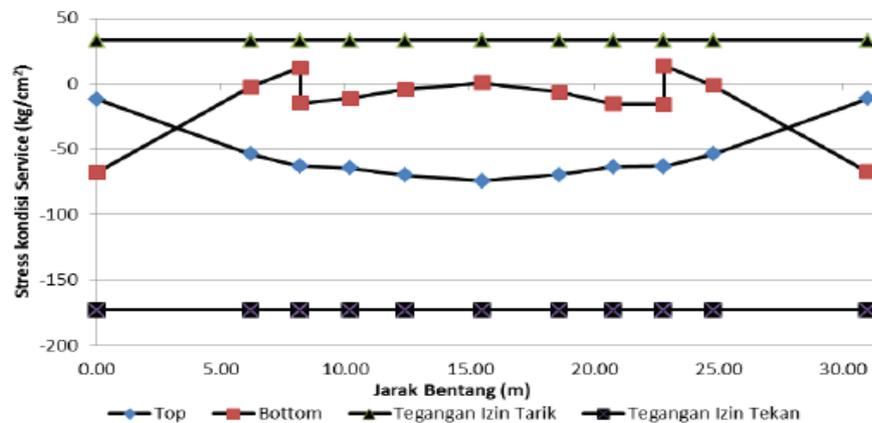
Gambar 2.7 Tegangan lentur kondisi transfer PC-I girder bentang 31.60 meter (Leo dan Agung, 2017).



Gambar 2.8 Tegangan lentur kondisi service PC-I girder bentang 31.60 meter (Leo dan Agung, 2017).



Gambar 2.9 Tegangan lentur kondisi transfer BH girder bentang 31.60 meter (Leo dan Agung, 2017).



Gambar 2.10 Tegangan lentur kondisi service BH girder bentang 31.60 meter (Leo dan Agung, 2017).

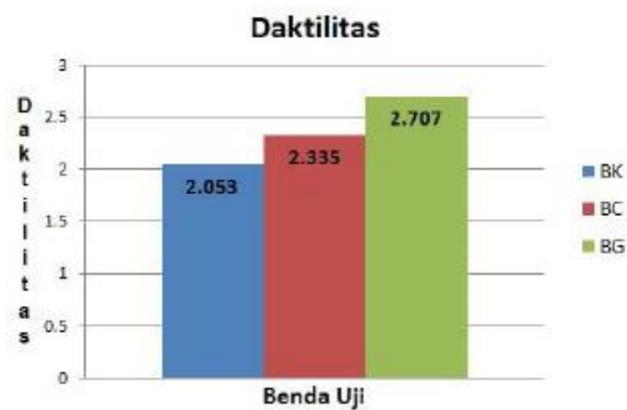
2.1.3. Balok Beton Bertulang

Nurlina dkk. (2016) mengkaji pengaruh perkuatan *CFRP* terhadap daktilitas balok beton bertulang, mengetahui pengaruh perkuatan *GFRP* terhadap daktilitas balok beton bertulang, dan juga mengetahui perbandingan daktilitas dengan menggunakan perkuatan *CFRP* dan *GFRP*. Benda uji dalam penelitian ini adalah balok beton bertulang dengan ukuran 10x15x120 cm³. Benda uji dibuat sebanyak 9 buah. Kesembilan benda uji dibagi menjadi 3 kelompok. Pegujian dilakukan pada Laboratorium. Hasil penelitian Balok yang diperkuat dengan *CFRP* memiliki daktilitas yang lebih besar daripada balok tanpa perkuatan. Balok yang diperkuat dengan *CFRP* mengalami peningkatan daktilitas yang signifikan terhadap balok tanpa perkuatan. Dimana peningkatan daktilitasnya yaitu sekitar

8/7 kali lebih besar dari daktilitas balok tanpa perkuatan. Untuk balok yang diperkuat dengan GFRP juga memiliki daktilitas yang lebih besar dibandingkan daktilitas balok tanpa perkuatan. Balok yang diperkuat dengan GFRP mengalami peningkatan yang signifikan terhadap balok tanpa perkuatan. Dimana prosentase peningkatan daktilitasnya yaitu sekitar 4/3 kali lebih besar dari daktilitas balok tanpa perkuatan. Balok yang diperkuat dengan GFRP memiliki daktilitas yang lebih besar daripada daktilitas balok yang diperkuat dengan CFRP, GFRP memiliki perbandingan kenaikan daktilitas yang lebih besar sekitar 6/5 kali dari daktilitas balok yang diperkuat CFRP.

Tabel 2.1 Hasil perhitungan daktilitas (Nurlina dkk., 2016)

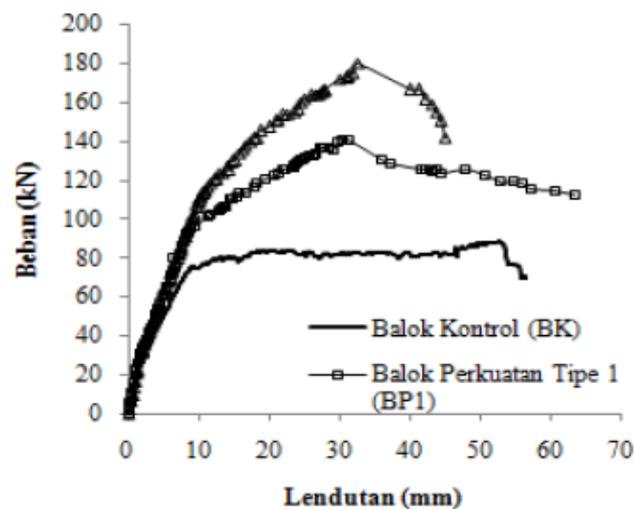
Balok	Daktilitas	Rata-Rata
BK1	1,884	
BK2	1,997	2,053
BK3	2,279	
BK1	-	
BK2	2,346	2,335
BK3	2,324	
BK1	2,802	
BK2	2,612	2,707
BK3	-	



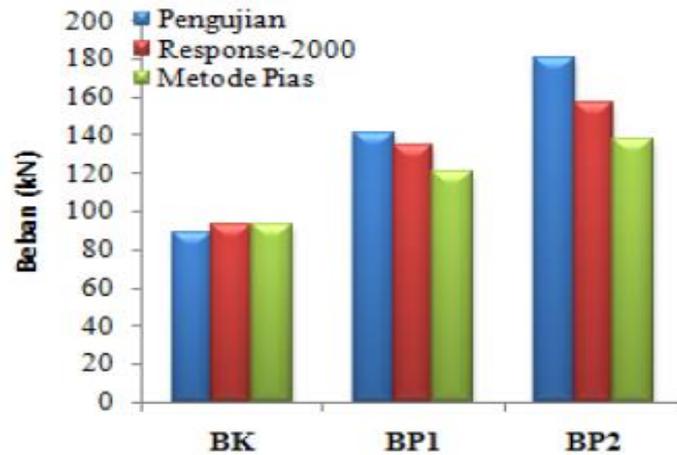
Gambar 2.11 Hasil perhitungan daktilitas (Nurlina dkk., 2016).

Haryanto (2011) melakukan pengujian pada 3 buah balok tampang T, yang masing-masingnya 1 balok tanpa perkuatan (BK), 1 balok diperkuat dengan 2 *wire rope* (BP1), dan 1 balok diperkuat dengan 4 *wire rope* (BP2). Jenis *wire rope* yang digunakan yakni *Independent Wire Rope Core* (IWRC) yang diameternya 10

mm. Metode pengujian digunakan beban statis dua titik dengan posisi flens dibawah atau dibagian flens mengalami tegangan tarik. Dari penelitian ini disimpulkan kapasitas beban menunjukkan peningkatan terhadap benda uji BP1 dan BP2 terhadap benda uji BK dengan indeks daktilitas benda uji BP1 dan BP2 mengalami penurunan terhadap benda uji BK dengan rasio masing-masing sebesar 0,62 serta 0,36, rasio berturut-turut yakni 1,59 dan 2,03, kekakuan awal benda uji BP1 dan BP2 memiliki rasio terhadap benda uji BK mendekati 1, masing-masing sebesar 1,09 dan 1,08, sehingga dapat dikategorikan terjadi peningkatan akan tetapi tidak signifikan, kekakuan efektif benda uji BP1 dan BP2 mengalami penurunan terhadap benda uji BK dengan rasio masing-masing sebesar 0,88 dan 0,92, benda uji BK mengalami keruntuhan lentur dengan kerusakan beton serat tekan terluar mulai terjadi pada saat mendekati beban maksimum, pada benda uji BP1 terjadi spalling pada saat tercapai beban maksimum sedangkan pada benda uji BP2 retak rambut antara lapisan mortar dan beton lama mulai terbentuk pada capaian beban rendah.



Gambar 2.12 Hubungan beban-lendutan masing-masing benda uji (Haryanto, 2011).



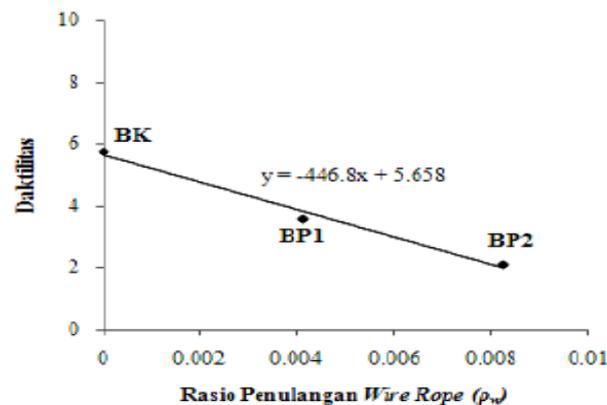
Gambar 2.13 Perbandingan kapasitas bebas (Haryanto, 2011).

Tabel 2.2 Perbandingan kapasitas beban hasil pengujian (Haryanto, 2011)

Benda Uji	Beban Maksimum (Kn)				
	Hasil Pengujian	Analisis Teoritis			
		<i>Response e-2000</i>	*Rasio	Metode Pias	*Rasio
BK	88,5	92,82	1,05	93,27	1,05
BP1	140,8	134,07	0,95	120,63	0,85
BP2	180	156,45	0,89	137,49	0,76

Tabel 2.3 Hubungan rasio penulangan *wire rope* dan daktilitas (Haryanto, 2011)

Benda Uji	δ_y (mm)	δ_u (mm)	Daktilitas ($\mu = \delta_u / \delta_y$)	Rasio
BK	9,79	56,51	5,77	-
BP1	17,68	63,61	3,60	0,62
BP2	21,56	45,00	2,10	0,36



Gambar 2.14 Hubungan rasio penulangan *wire rope* dan daktilitas (Haryanto, 2011).

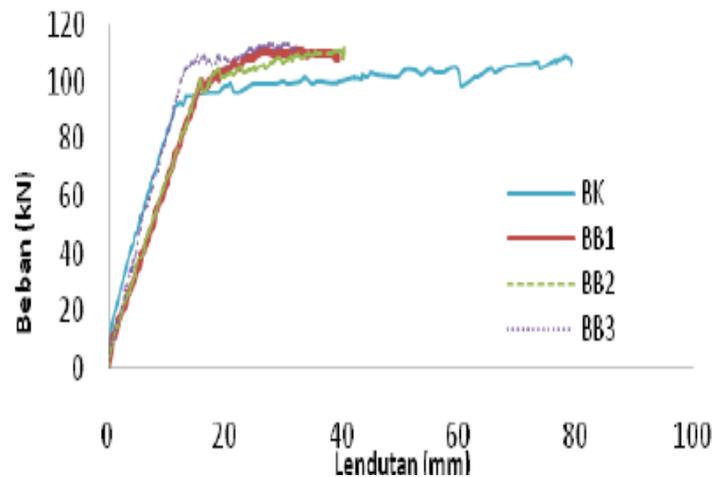
Amir dkk. (2011) melakukan penelitian dengan menggunakan beton jadi dan baja tulangan KS berdiameter S13 dan JKS berdiameter P6, tripleks dan kayu reng yang digunakan untuk bekisting serta *polyfoam* digunakan sebagai pengisi lubang. Alat-alat yang dipakai menguji balok uji terdiri dari *loading frame*, *data logger*, *hydraulic jack* dan *hydraulic pump*, *load cell*, *LVDT (Linear Variable Differential Transducer)*, *accelerometer*, *mechanical vibrator*, *amplifier sensor*, dan set komputer dengan *Analog Convertor(PCL-812G)*. Pembuatan benda uji terdiri dari 4 buah balok yang lebar 200 mm, ukuran tinggi 300 mm, serta panjang 3500 mm (SNI 03-1747-1989 dengan bentang 7 meter yang berdimensi 40/60, skala 1:2). Skala pemodelan yang digunakan adalah 1:2. Benda uji terdiri dari satu buah benda balok kontrol (BK) berupa balok I dan tiga benda uji berupa balok persegi berlubang (BB1, BB2, BB3). Dari hasil pengujian pada tiga silinder beton memperoleh kuat tekan yang rata-rata sebesar 33,786 MPa dan kuat tarik baja tulangannya D13 dan P6 sebesar 428,532 MPa dan 340,179 MPa.

Tabel 2.4 Hasil pengujian balok uji lentur (Amir dkk., 2011)

NO	Benda Uji	Kapasitas Beban (Kn)		Lendutan yang terjadi (mm)		Lebar Retak (mm)	% kekuatan (Pmax) terhadap BK
		Retak		Retak		Retak 1	BK
		1	Maks	1	Maks		
1	BB1	16,9	110,8	1,793	31,400	0,03	2,03
2	BB2	15,9	111,3	0,72	40,307	0,04	2,49
3	BB3	15,6	112,9	0,795	30,480	0,02	3,96
4	BK	16,5	108,6	0,650	77,797	0,08	0,00

Tabel 2.5 Nilai kekakuan lentur balok (Amir dkk., 2011)

Benda Uji	P Crack (N)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/mm)	Persen Peningkatan Kekakuan* (%)	Keterangan
BB1	16900	0,793	9423,792	-62,88	Menurun
BB2	15900	0,72	9244,186	-63,58	Menurun
BB3	15600	0,795	19622,642	-22,7	Menurun
BK	16500	0,65	25384,615	0	-



Gambar 2.15 Hubungan beban dan lendutan benda uji lentur hasil eksperimen (Amir dkk., 2011).

Tabel 2.6 Nilai kekakuan balok dalam kondisi leleh (Amir dkk., 2011)

Benda Uji	P leleh (N)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/mm)	Persen Peningkatan Kekakuan* (%)	Keterangan
BB1	98200	15,487	6340,94	-11,308	Menurun
BB2	98800	15,47	6386,55	-10,67	Menurun
BB3	102500	12,823	7993,24	11,803	Meningkat
BK	98900	13,833	7149,4	0	-

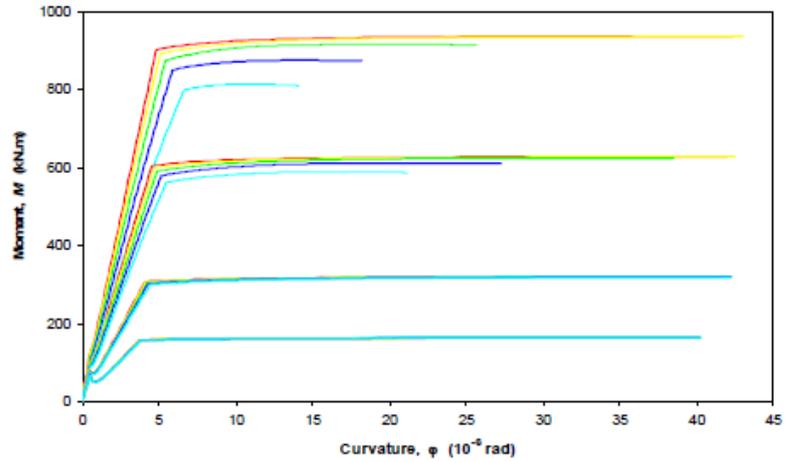
Tabel 2.7 Nilai daktilitas balok uji (Amir dkk., 2011)

Benda Uji	δ_y (mm)	δ_u (mm)	Daktalitas $u = \delta_u/\delta_y$	Penurunan terhadap BK (%)	Keterangan
a BB1	15,487	32,433	2,094	-50,106	Menurun
b BB2	15,470	34,843	2,252	-46,398	Menurun
c BB3	12,823	26,949	2,102	-58,543	Menurun
d BK	13,833	65,004	4,699	0	-

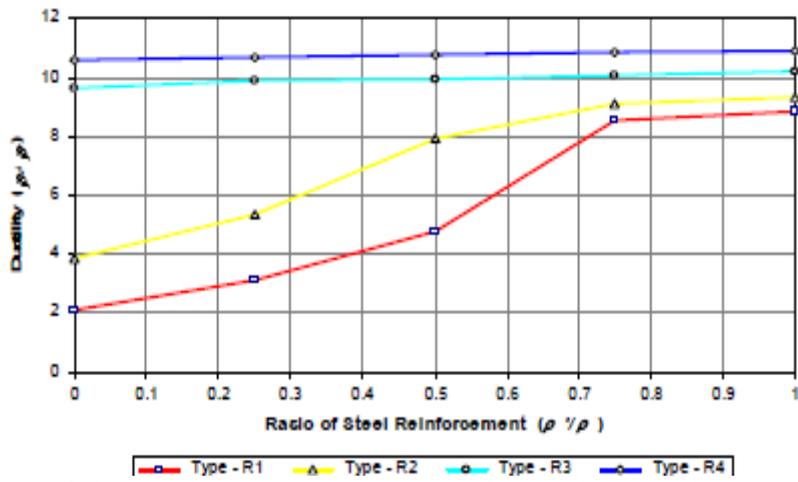


Gambar 2. 16 Frekuensi alami tumpuan sendi-rol hasil eksperimen beban dinamik (Amir dkk., 2011).

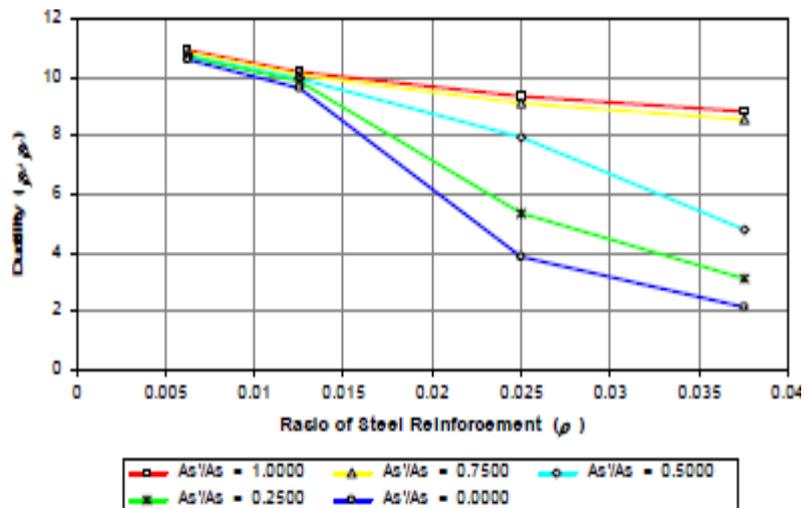
Nur (2009) meneliti pengaruh dari penambahan tulangan tekan pada daktilitas kurvatur balok beton bertulang dengan menggunakan 20 model balok beton bertulang rangkap dengan memvariasikan luas tulangan tekan serta luas tulangan tarik. Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan disimpulkan bahwa enam bahan tulangan tekan pada balok beton bertulang tersebut, tidak banyak memberikan kontribusi pada peningkatan kekuatan balok namun sangat membantu dalam meningkatkan daktilitas kurvatur penampang. Hal tersebut dikarenakan adanya peningkatan kekuatan pada daerah tekan penampang balok yang mengakibatkan tulangan baja pada daerah tarik akan dipaksa meleleh lebih cepat. Penampang balok beton bertulang yang mempunyai luas tulangan tarik yang lebih sedikit, dan cenderung mempunyai nilai daktilitas kurvatur yang besar, akan tetapi kekuatannya lebih rendah. Hal tersebut dikarenakan adanya perlemahan pada daerah tarik penampang yang mengakibatkan tulangan baja pada daerah tarik dipaksa agar meleleh lebih cepat. Selain itu, dengan penambahan tulangan tekan juga akan menyebabkan kedalaman garis netral menjadi kecil, yang mengakibatkan kurvatur penampang menjadi lebih besar.



Gambar 2.17 Kurva momen-kurvatur pada balok beton bertulang (Nur, 2009).



Gambar 2.18 Daktilitas kurvatur – rasio luas tulangan baja berdasarkan tipe balok (Nur, 2009).



Gambar 2.19 Daktilitas kurvatur – rasio luas tulangan baja berdasarkan luas tulangan (Nur, 2009).

Syamsuddin dkk. (2015) meneliti pengaruh adukan beton dengan campuran dari *bottom ash* pada semen sebanyak 0%, 10%, 20%, 25% selama perendaman dengan air laut durasi 7, 14 serta 28 hari pada beton. Pada pengujian ini balok diletakkan dengan tumpuan sendi – roll. Sebelum dilakukan pembebanan perlu dilakukan pengaturan konfigurasi terhadap alat pengukur lendutan sehingga siap untuk digunakan. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa adanya pengaruh yang nyata dari pemanfaatan *bottom ash* sebagai pengganti semen terhadap kuat tekan beton silinder, penambahan dari *bottom ash* pada balok dengan tulangan geser serta lentur tidak mempengaruhi nilai lendutan secara signifikan. Hal ini disimpulkan berdasarkan uji statistik anova 2 arah untuk variasi presentase dari *bottom ash* 0%, 10%, 20% dan 25% dan perendaman balok dengan tulangan geser dan lentur tidak mempengaruhi nilai dari lendutan secara signifikan, baik pada perendaman 7, 14 maupun 28 hari, lendutan pada balok dengan tulangan lentur dan geser sebesar 4,5833 mm dapat disimpulkan bahwa nilai beban yang terjadi saat lendutan izin terbesar terdapat pada balok tulangan geser yakni sebesar 1103.48 kg.

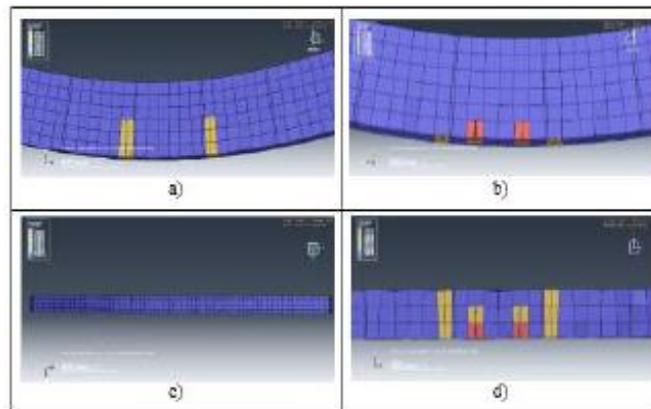
Tabel 2.8 Hasil uji kuat tekan (Syamsuddin dkk., 2015)

Kadar <i>Bottom ash</i> (%)	Umur Beton (hari)	Kuat Tekan (Mpa)		
		Rendaman 7 hari	Rendaman 14 hari	Rendaman 28 hari
0	28	17,10	15,9	18,49
10	28	19,05	19,77	18,99
20	28	15,41	16,13	17,79
25	28	15,48	15,01	16,76

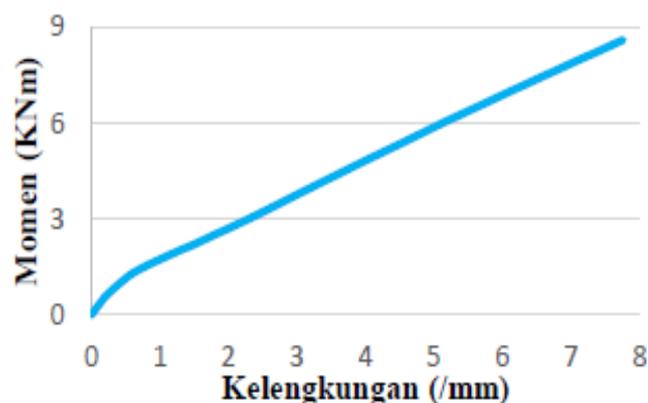
2.1.4. Balok Pracetak

Putra dkk. (2017) meneliti balok semi pracetak satu lapis dan dua lapis yang dibebani dengan metode dua beban (*two point loading*) di sepertiga panjang bentang balok. Hasil dari uji numerik pemodelan elemen hingga balok semi pracetak dengan variasi dimensi tinggi dari balok semi pracetak yang ditinjau menggunakan software Abaqus. Berdasarkan dari hasil analisisnya dapat disimpulkan bahwa balok semi pracetak 1 lapis dan 2 lapis yang dianalisis mengalami retak yang diakibatkan oleh lentur, dikarenakan posisi terjadinya retak

berada di daerah bidang lentur yang mengalami tegangan tarik, kekakuan balok semi pracetak meningkat seiring dengan pertambahan dimensi tinggi balok semi pracetak. Kekakuan pada balok semi pracetak 1 lapis, kelengkungan yang terjadi balok semi pracetak meningkat seiring pertambahan dimensi balok semi pracetak, kapasitas kekuatan maksimum balok semi pracetak meningkat seiring dengan pertambahan dimensi tinggi balok.



Gambar 2.20 Pola penjalaran retak balok semi pracetak 1 lapis tinggi 290 mm (Putra dkk., 2017).

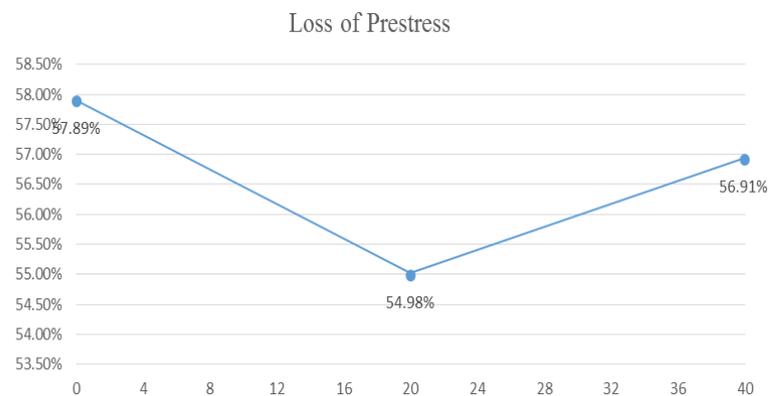


Gambar 2.21 Perbandingan momen curvature balok semi pracetak 1 lapis tinggi 140 mm (Putra dkk., 2017).

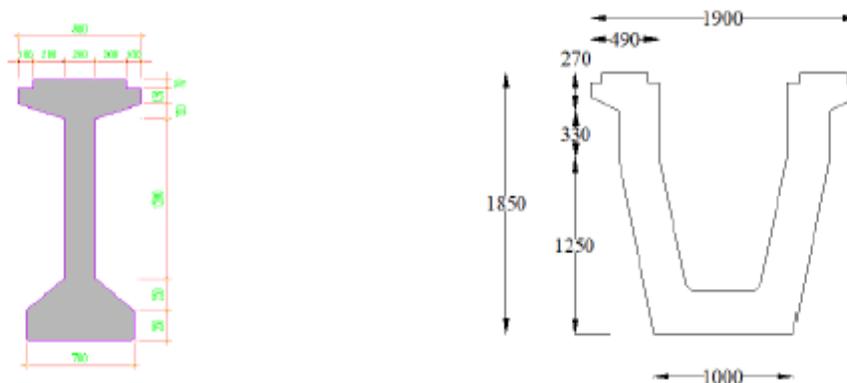
2.1.5. Balok Precast U dan I

Lubis dan Karolina (2017) melakukan perbandingan pada jenis – jenis girder, untuk mendapatkan jenis girder yang paling efektif maka tersebut, perbandingan yang dilakukan pada struktur atas jembatan yakni *slab* lantai jembatan, *deck slab*, *diafragma*, *Dapped End* serta *End Block*. Selanjutnya

mendapatkan perubahan pada gaya dalam, tegangan, kehilangan gaya prategang, lendutan, reaksi perletakan, dan volume beton yang digunakan pada jembatan tersebut. Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data yang diperoleh dari lapangan seperti karakteristik beton prategang, spesifikasi balok, serta pembebanan. Selanjutnya dilakukan perhitungan *Section properties* penampang girder, kombinasi pembebanan ultimit, analisa momen dan geser, analisa tegangan dan lendutan, perencanaan gaya prategang, losses aktual desain *dapped end & end blok*, serta perbandingan antara balok PCI dan PCU. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa Jembatan U girder yang ditinjau dari lendutan, momen, dan tegangan mempunyai tingkat keefektifan lebih tinggi dibandingkan dengan I girder, pada penampang U girder membutuhkan jumlah tendon yang lebih banyak yakni 10 buah, sehingga memiliki gaya prategang yang lebih besar dari I girder yang menggunakan 5 buah, selisih volume pekerjaan pada U girder lebih besar 1.66 % dibandingkan dengan jembatan I girder dan ada analisa ini Losses prediksi mendekati losses aktual.



Gambar 2.22 Kehilangan gaya prategang (Lubis dan Karolina, 2017).



Gambar 2.23 Perbandingan PCI dan PCU girder (Lubis dan Karolina, 2017).

Sukarno dan Sulisty (2011) meneliti balok penampang T berlubang memanjang dengan memodelkan dua jenis balok BB serta BK agar meninjau perilaku lentur pada balok tersebut. Benda uji dalam penelitian ini yaitu balok beton bertulang. Tumpuan pada balok yaitu sendi dan rol dengan pembebanan berupa beban terpusat manatonic yang diberikan secara bertahap sebesar 1 KN yang dilimpahkan pada dua titik hingga mencapai beban ultimitnya. Pada pemodelan elemen hingga non linier tersebut hanya dibuat dua buah model yang mewakili sebagai pembanding, yakni sebuah model balok berlubang (BB) dan balok kontrol (BK). Pemodelan elemen hingga dilakukan dengan cara *Graphical User Interface* (GUI) dan bantuan program GID, yang dapat berinteraksi dengan program ATENA. Dalam hal ini program GID digunakan untuk melakukan gambar geometri, kondisi batas (*boundary condition*) input material, seeta *mesh* elemen hingga untuk analisis nonlinier tiga dimensi. Input data yang dihasilkan dari GID kemudian akan diproses oleh ATENAWin. Model elemen hingga non linier ini menggunakan pendekatan *smeared cracking model* dengan model solid tiga dimensi (3D). Hasil dari analisis lentur balok penampang-T berlubang memanjang dengan menggunakan program ATENA ini dapat disimpulkan bahwa analisis dengan program ATENA untuk balok berlubang (BB), balok control (BK) memberikan hasil hubungan beban lendutan yang hampir sama baik, kurva hubungan beban–lendutan, beban ultimit model numerik balok BB 96,71 % dari model eksperimen, sedangkan lendutan 135,96 % dari model eksperimen.

Tabel 2.9 Daktilitas benda uji balok berlubang (Sukarno dan Sulisty, 2011).

Hasil	Y (mm)	U (mm)	Daktalitas	Rasio
Pengujian BB1	15,487	32,433	2,094	
Pengujian BB2	15,47	34,843	2,252	
Pengujian BB3	12,823	26,95	2,102	
Numerik	9,91	46,31	4,673	

Tabel 2.10 Hasil dan uji parameter variasi mutu beton balok berlubang (Sukarno dan Sulisty, 2011).

Mutu Beton fc	Beban (K N)	Retak Awal	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/m m)	Beban (K N)	Leleh (Yield)	Kekakuan (N/m m)	Beban (K N)	Runtuh (Ultied)	Lendutan (mm)	Daktilitas
		Lebar Retak (mm)				Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)		
20 Mpa	25	3	0.85	29,41	94	9,91	9,485.	105	2,67	68,07	6,869
33,786 Mpa	31	2	0.84	36,90	94	9,91	9,485.	108	1,771	46,31	4,673
50 Mpa	36	1	0.82	43,90	94	9,99	10,45	107	1,007	68,07	2,892

Tabel 2.11 Hasil dan uji parameter variasi ukuran lubang penampang beton balok berlubang (Sukarno dan Sulisty, 2011).

Ukuran Lubang Penampang Beton	Beban (K N)	Retak Awal	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/m m)	Beban (K N)	Leleh (Yield)	Kekakuan (N/m m)	Beban (KN)	Runtuh (Ultied)	Lendutan (mm)	Daktilitas
		Lebar Retak (mm)				Lendutan (mm)			Lebar retak (mm)		
50%	31	1.333, 10	0.82	37.80	96	9,75	9.846	107	1,617	29,8	3,056
100%	31	2.681, 10	0.84	36.90	94	9,91	9.485	108	1,771	45,31	4,673
150%	29	5.697, 10	0.82	35.36	93	9,93	9.365	108	3,203	51,69	5,205

2.2. Dasar Teori

Balok adalah komponen struktur yang bertugas meneruskan beban yang disangga sendiri maupun dari pelat kepada kolom penyangga. Balok menahan gaya yang bekerja dalam arah trasversal terhadap sumbuhnya yang mengakibatkan terjadinya lenturan (Dipohusodo, 1994).

Menurut Nawy (1990), berdasarkan jenis keruntuhannya, keruntuhan yang terjadi pada balok dapat dikelompokkan menjadi 3 kelompok yaitu:

1. Penampang *balanced*

Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai renggangan batas dan akan hancur karena tekan. Pada awal terjadinya keruntuhan, renggangan tekan yang diijinkan pada saat serat tepi yang tertekan yakni 0,003 sedangkan pada regangan baja sama dengan regangan lelehnya yakni $\epsilon_y = f_y / E_c$

2. Penampang *over-reinforced*

Keruntuhan ini ditandai dengan hancurnya beton yang tertekan. Pada awal keruntuhan regangan baja ϵ_s yang terjadi masih lebih kecil dibandingkan dengan regangan lelehnya ϵ_y . Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak daripada yang diperlukan dalam keadaan *balanced*.

3. Penampang *under-reinforced*

Keruntuhan ditandai dengan terjadinya leleh pada tulangan baja. Kondisi penampang yang demikian dapat terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi *balanced*.

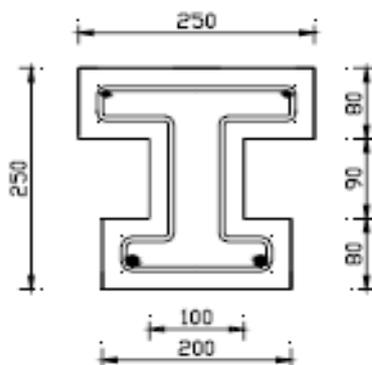
2.2.1. Jenis-jenis balok beton bertulang

Balok beton bertulang adalah sebuah balok diantara dua penyangga pada suatu bangunan gedung, jembatan atau *fly over*. Umumnya balok beton bertulang ada beberapa macam salah satunya balok girder berbentuk I, namun girder juga dapat berbentuk box (*box girder*), dan balok T, atau bentuk lainnya.

Menurut bentuknya, jenis balok beton bertulang dapat dibedakan menjadi beberapa tipe seperti berikut ini.

1. Balok I

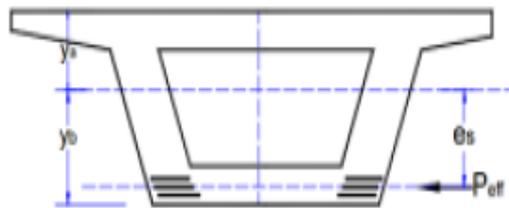
Balok dengan bentuk balok I sering disebut dengan *PCI Girder* yang dibuat dari material (material baja maupun beton). Balok bentuk ini dapat terbuat dari bahan komposit maupun bahan non komposit, dalam memilih hal ini perlu dipertimbangkan berbagai hal seperti jenis kekuatan yang diperlukan serta biaya yang akan dikeluarkan.



Gambar 2.24 Balok I girder (Noorhidana dkk., 2009).

2. Box Girder

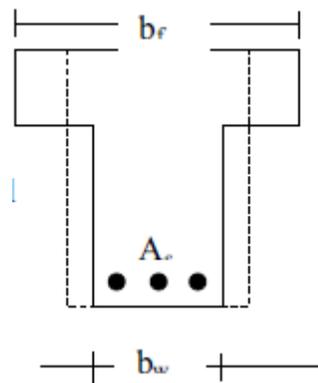
Box girder sangat cocok digunakan untuk jembatan bentang panjang. Biasanya box girder didesain sebagai struktur menerus di atas pilar karena box girder dengan beton prategang dalam desain biasanya akan menguntungkan untuk bentang menerus. Box girder ini sendiri dapat berbentuk kotak maupun trapesium, akan tetapi bentuk trapesium lebih digemari penggunaannya karena akan memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan bentuk kotak.



Gambar 2.25 Box girder (Prasetya dkk., 2016).

3. Balok T

Balok T ekonomis untuk bentang 40-60 ft, akan tetapi pada struktur jembatan miring, perancangan balok T diperlukan rangka kerja yang lebih rumit. Perbandingan bentang struktur serta tebal pada balok T yang dianjurkan yaitu sebesar 0,065 untuk struktur bentang menerus dan 0,07 pada struktur bentang sederhana



Gambar 2.26 Balok T (Noorhidana dkk., 2009).

2.2.2. Pembebanan pada balok

Perencanaan Pembebanan (PPPURG, 1987) yang terjadi pada struktur bangunan diakibatkan oleh beban-beban berikut ini.

1. Beban mati (*dead load*)

Beban mati adalah beban yang selalu ada pada struktur termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian-penyelesaian, mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian tak terpisahkan dari gedung

2. Beban hidup (*life load*)

Beban hidup adalah beban yang sifatnya berpindah-pindah dan kedalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah, mesin-mesin serta peralatan yang tidak merupakan bagian yang tak terpisahkan dari struktur bangunan dan dapat diganti selama masa hidup dari bangunan tersebut, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap tersebut. Khusus pada atap kedalam beban hidup dapat termasuk beban yang berasal dari air hujan, baik akibat genangan ataupun tekanan jatuh (energi kinetik) butiran air.

3. Beban angin (*wind load*)

Beban angin merupakan semua beban yang bekerja pada bagian dari struktur bangunan yang disebabkan oleh selisi tekanan udara.

4. Beban gempa

Beban gempa yaitu semua beban-beban statik ekuivalen yang bekerja pada struktur bangunan yang menirukan pengaruh pada gerakan tanah akibat gempa itu. Dalam hal ini pengaruh gempa pada struktur bangunan ditentukan berdasarkan suatu analisa dinamik, maka yang diartikan beban gempa disini ialah gaya-gaya yang terjadi oleh gerakan tanah akibat gempa itu.

5. Beban khusus

Beban khusus adalah semua beban yang terjadi pada bangunan akibat selisih suhu, pengangkutan dan pemasangan, gaya-gaya tambahan yang berasal dari beban hidup seperti gaya rem yang berasal dari kran, gaya setrifugal dan gaya dinamis yang berasal dari mesin-mesin, serta pengaruh pengaruh khusus lainnya.

2.2.3. Analisis Balok Beton Bertulang

Balok adalah komponen struktural suatu konstruksi yang memiliki peran untuk memikul beban lentur, geser, dan aksial. Dalam memikul beban struktural balok akan mengalami gaya-gaya dalam berupa momen, geser, dan normal serta juga mengalami deformasi, yang mengakibatkan kerusakan pada balok. Ada 3 kemungkinan jenis keruntuhan yang mungkin terjadi yaitu seperti berikut ini.

1. Keruntuhan Tarik (*Ductile*)

Pada keruntuhan tarik, tulangan leleh sebelum beton hancur atau mencapai regangan batas tekan. Keruntuhan tarik terjadi pada penampang dengan rasio tulangan yang kecil. Pada balok yang mengalami keruntuhan ini disebut "*underreinforced*"

2. Keruntuhan Tekan (*Brittle/Getas*)

Pada keruntuhan tekan, beton hancur sebelum tulangan leleh. Keruntuhan tekan biasanya terjadi pada penampang dengan rasio tulangan yang besar. Balok yang mengalami keruntuhan seperti ini disebut "*overreinforced*"

3. Keruntuhan Seimbang (*Balance*)

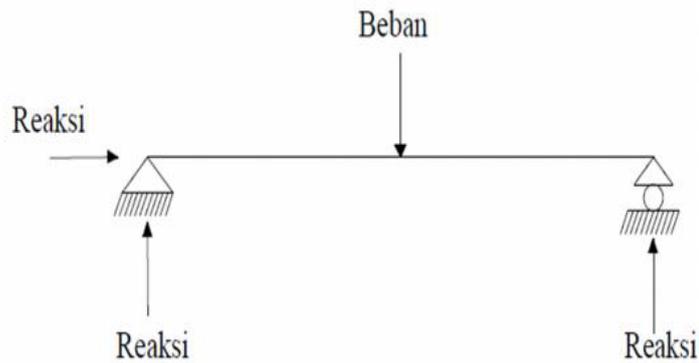
Pada keruntuhan seimbang, beton hancur dan besi tulangan leleh terjadi secara bersamaan. Balok seperti ini mempunyai tulangan yang seimbang.

Kerusakan balok terjadi akibat pengaruh gaya luar dan gaya dalam sebagai berikut ini:

a. Gaya luar

Gaya-gaya yang bekerja di luar struktur atau muatan dan reaksi yang menciptakan kestabilan struktur disebut gaya luar. Gaya Luar terbagi atas dua bagian, antara lain :

- 1) Muatan (Gaya Aksi) : Beban yang bekerja pada suatu struktur dan selalu mempunyai besaran arah, dan garis kerja.
- 2) Reaksi Tumpuan (Gaya Reaksi) : Gaya lawan yang ditimbulkan pada suatu struktur



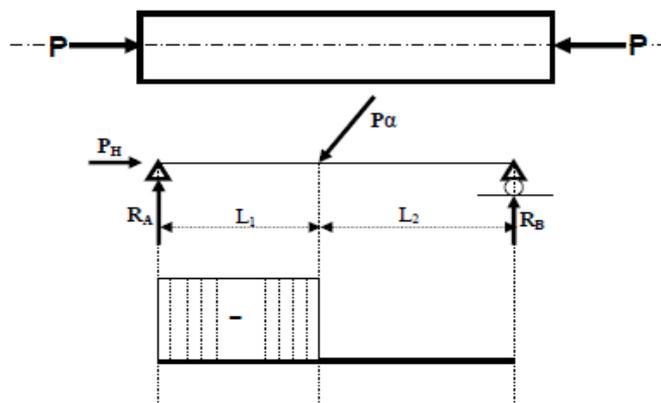
Gambar 2.27 Prinsip statika keseimbangan (Popov, 1996).

a. Gaya dalam

Gaya dalam yaitu gaya yang bekerja didalam suatu konstruksi. Analisis gaya dalam ada 3 jenis gaya yang bekerja di suatu balok yaitu sebagai berikut ini.

1) Gaya normal (*Normal Force Diagram*)

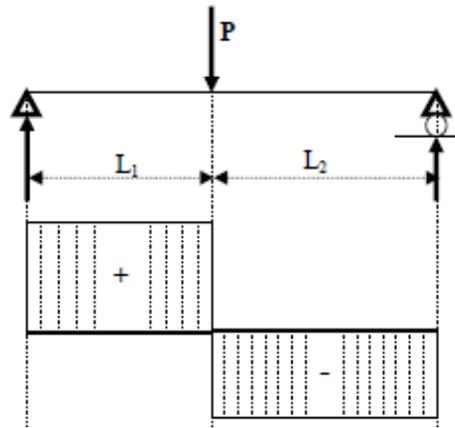
Gaya normal adalah gaya dalam yang bekerja tegak lurus pada penampang suatu batang atau bekerja dengan garis berimpit dengan batang.



Gambar 2.28 Normal forces diagram (Ma'arif, 2012).

2) Gaya geser (*Shear Forces Diagram*)

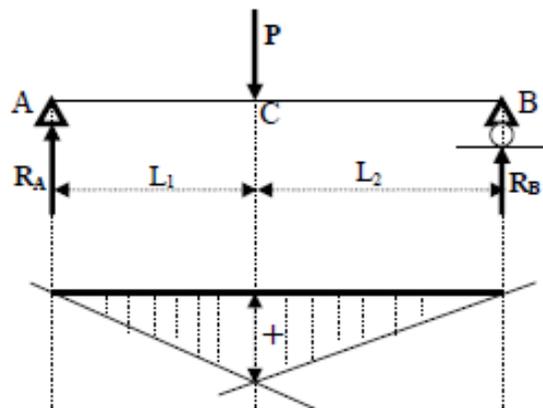
Gaya geser merupakan gaya yang bekerja tegak lurus terhadap arah panjang batang atau terhadap potongan melintang yang menyebabkan suatu penampang akan bergeser bergerak keatas atau kebawah satu sama lain.



Gambar 2.29 Shear forces diagram (Ma'arif, 2012).

3) Momen (*Bending Moment Diagram*)

Momen merupakan gaya pada suatu struktur yang menyebabkan struktur tersebut mengalami lentur

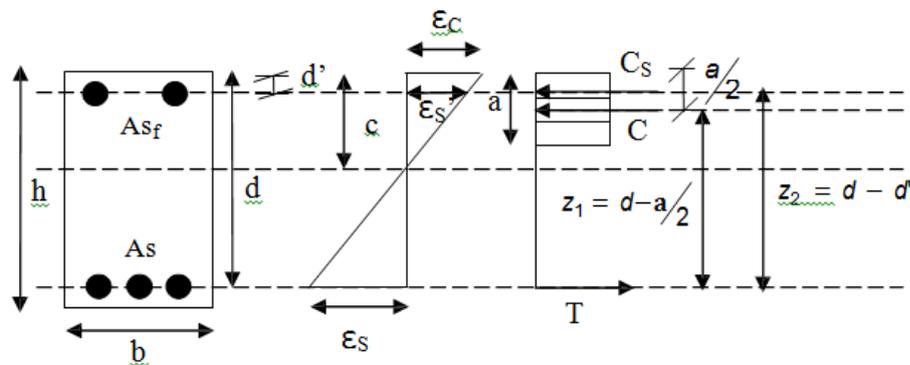


Gambar 2.30 Bending moment diagram (Ma'arif, 2012).

Jenis pembebanan dan momen yang terjadi pada balok diatas dapat dikatakan bahwa momen luar harus dilawan oleh momen dalam yang diberikan dari kekuatan penampang balok tersebut. Besarnya momen ultimate diatur didalam BSN (2002) ini sebagai hasil dari kombinasi terfaktor dari momen lentur akibat beban hidup ($LL = Live Load$) dan beban mati ($DL = Dead Load$) serta adanya pengaruh beban-beban lainnya yang berhubungan dengan kondisi alam. Pada momen dalam yang harus dimiliki oleh penampang balok agar dapat menahan momen luar *ultimite* yang terjadi dinyatakan dalam istilah Momen nominal. Dalam konstruksi bangunan hampir semua balok menggunakan tulangan

rangkap. Tulangan rangkap sebenarnya hanya tulangan tambahan pada daerah tekan, dan memudahkan untuk pemasangan sengkang. Fungsi dari tulangan tekan ini sebagai berikut:

1. meningkatkan kekakuan penampang sehingga dapat mengurangi defleksi struktur,
2. meningkatkan kapasitas rotasi penampang yang berkaitan dengan peningkatan daktilitas penampang,
3. dapat menahan kemungkinan adanya momen yang berubah-ubah dan
4. meningkatkan momen tahanan penampang karena dimensi penampang.



Gambar 2.31 Diagram regangan dan tegangan balok tulangan rangkap (Adam, 2016).

Untuk meyakinkan kondisi tersebut maka harus dilihat apakah nilai kedalaman balok beton a yang didapat dari keseimbangan tulangan terpasang masih lebih kecil atau lebih besar dari a_b bila $a < a_b$ maka tulangan terpasang dan akan menghasilkan tulangan liat, tetapi apabila $a > a_b$ maka tulangan akan dipasang akan menghasilkan penulangan getas / *brittle*. Untuk menghindari penulangan getas peraturan mensyaratkan agar kemampuan balok hanya dibatasi sampai pada $a = a_b$. Langkah penyelesaian :

1. Menetapkan nilai $\beta_1 =$ untuk f_c' antara 17-28 MPa, β_1 sebesar 0,85, diatas 28 Mpa β_1 harus direduksi sebesar 0,05 untuk setiap kelebihan kekuatan sebesar 7 MPa diatas 28 Mpa, tepi β_1 tidak boleh diambil kurang dari 0,65. Sesuai dengan pasal 10.2.7.3, (SNI-2847-2013).
2. Memasukan fariabel d , f_y dan β_1 kedalam persamaan 3.8

$$a_b = \beta_1 \cdot 600 \cdot d \cdot (600f_y) \dots \dots \dots (2.1)$$

3. Melalui persamaan keseimbangan gaya $C_s + C_c = T_s$ dan melalui anggapan terlebih dahulu maka akan didapat nilai kedalaman garis netral (c) atau kedalam balok beton tekan (a). Bila hasil kontrol tersebut didapat kesesuaian dengan anggapan semula maka anggapan-anggapan itu benar, tetapi bila tidak berti anggapan itu harus diubah berdasarkan hasil dari kontrol tersebut.
4. Anggapan-anggapan tersebut sebagai berikut ini.
 - a. Letak garis/sumbu netral, letak garis sumbu netral dapat dianggap terletak di daerah selimut beton/penutup beton atau diantara tulangan tarik dan tekan. Posisi ini dapat diperkirakan dari perbandingan antara luas tulangan tarik dan tulangan tekan, bila tulangan tarik cukup banyak sehingga mendekati kondisi berimbang maka letak garis netral diantara tulangan tarik dan tulangan tekan dan bila sebaliknya letak garis netral berada didaerah selimut beton.
 - b. Kondisi regangan tulangan tarik dan tekan (leleh atau tidaknya) bila anggapan regangan itu leleh maka gaya itu tarik atau tekan yang digunakan diadaptasi dari perkalian (A) dan tegangan leleh (f_y) tetap bila tidak leleh maka gaya tarik atau tekan didapatkan dari perkalian antara luasan (A) dan tegangan kerja regangan \times modulus elastisitas beton $= \sigma \cdot E$. (Priyosulistyo, 2010).
5. Kedalaman
 - a. Tulangan tekan tarik :

$$\epsilon' = m \frac{c-d'}{m} 0,003 \dots \dots \dots (2.2)$$
 - b. Tulangan tarik : C_s

$$\epsilon_s = \frac{d-c}{c} 0,003 \dots \dots \dots (2.3)$$
 dengan :
 $d' =$ penutup beton tulangan.
 $d =$ kedalaman efektif tulangan tarik ($h - d_s$)
6. Kapasitas

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$M_{n1} = (A_s - A'_s) \cdot f_y \cdot (d - a/2) \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana

$$a = \frac{(A_s - A'_s) \cdot f_y}{(0,85 \cdot f_c' \cdot b)} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$M_{n1} = A'_s \cdot f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots(2.7)$$

Sehingga kapasitas nominal penampang juga dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ;

$$M_n = (A_s - A'_s) \cdot f_y \cdot (d - a/2) + f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots(2.8)$$

atau

$$M_n = A_{s1} \cdot F_y \cdot (d - a/2) + f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots(2.9)$$

Dalam memastikan keamanan kekuatan struktur maka disyaratkan momen rencana ($M_R = \phi \cdot M_n$) untuk itu harus lebih besar dari kombinasi momen luar yang terbesar yang bekerja pada (M_u) maka :

$$M_u \leq \phi \cdot M_n \dots\dots\dots(2.10)$$

Dari persamaan ($M_u \leq \phi \cdot M_n$) ini hanya digunakan ketika tulangan (A'_s) telah mencapai batas maksimalnya atau leleh, apabila tegangan leleh masih belum tercapai maka balok tersebut dianggap sebagai balok tulangan tunggal dan lebih tepat jika tegangan aktual (f_c') pada tulangan tekan maka dari itu untuk keseimbangan momennya menggunakan gaya aktual

7. Syarat untuk tulangan tekan (A'_s) meleleh dapat diturunkan dengan bantuan :

$$\epsilon_s = \frac{d-c}{c} \cdot 0,003 = (1 - \frac{d'}{c}) \cdot 0,003 \dots\dots\dots(2.11)$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{(A_s - A'_s) \cdot f_y}{\beta_1 \cdot (0,85 \cdot f_c' \cdot b)} = \frac{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d}{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c'} \dots\dots\dots(2.12)$$

hingga dapat diperoleh :

$$\epsilon_s = (1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d}) \cdot 0,003 \dots\dots\dots(2.13)$$

Apabila baja tulangan leleh maka dicapai suatu kondisi dimana

$$\epsilon'_s \geq \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{200000} \text{ sehingga}$$

$$(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d}) \cdot 0,003 \geq \frac{f_y}{200000} \dots\dots\dots(2.14)$$

Atau

$$(\rho - \rho') \geq \left(\frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d}{f_y \cdot d} \right) \cdot \left(\frac{f_y}{600 - f_y} \right) \dots \dots \dots (2.15)$$

Jika tulangan tekan ($A's$) belum leleh maka tegangan aktualnya dapat dihitung sebesar $f_s' = \epsilon_s \cdot E_s$ atau

$$f_s' = \left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d} \right) \text{ Mpa} < f_y \dots \dots \dots (2.16)$$

$$f_s' = 600 \cdot \left(1 - \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f_c' \cdot d'}{(\rho - \rho') \cdot f_y \cdot d} \right) \text{ MPa} < f_y \dots \dots \dots (2.17)$$

8. Apabila tulangan tekan ($A's$) belum leleh untuk itu tinggi balok tegangan tekan ekuivalen dihitung dengan menggunakan tegangan aktual pada tulangan yang diperoleh dari regangan tulangan tekan (ϵ_s) sehingga ;

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A's \cdot f_s'}{(0,85 \cdot f_c' \cdot b)} \dots \dots \dots (2.18)$$

dengan demikian terjadi perubahan pada momen nominal menjadi :

$$M_n = (A_s \cdot f_y - A's \cdot f_s') \left(d - \frac{a}{2} \right) + A's \cdot f_s' (d - d) \dots \dots \dots (2.19)$$

9. Pembatas baja tulangan balok persegi

SNI 2002 menetapkan bahwa tulangan baja tarik tidak boleh melebihi 0,75 dari baja tulangan tarik yang diperlukan sehingga SNI 2002 menetaapkan batasan untuk ρ sebesar :

$$\rho_{max} = 0,75 \rho_b \dots \dots \dots (2.20)$$

$$\rho' = 0,85 \beta \left(\frac{f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \dots \dots \dots (2.21)$$

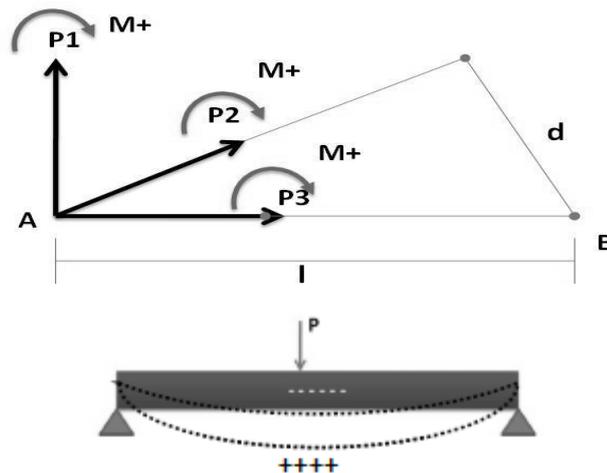
dan batas rasio untuk penulangan minimum sebesar :

$$\rho_{min} = 1,4 / f_y \dots \dots \dots (2.22)$$

2.2.4. Momen

Momen adalah hasil kali antara gaya dengan jaraknya. Jarak disini adalah jarak tegak lurus dengan garis kerja gayanya. Bidang momen diberi tanda positif jika bagian bawah atau bagian dalam yang mengalami tarikan. Bidang momen positif diarsir tegak lurus sumbu batang yang mengalami momen. Sebaliknya, apabila yang mengalami tarikan pada bagian atas atau luar bidang momen, maka diberi dengan tanda negatif. Bidang momen negatif diarsir sejajar dengan sumbu batang. Momen terjadi apabila sebuah gaya bekerja mempunyai jarak tertentu dari titik yang akan menahan momen tersebut dan besarnya momen tersebut adalah

besarnya yang dikalikan dengan jaraknya. Momen dapat mengakibatkan perubahan bentuk pada penampang. Batang akan mengalami perubahan bentuk menjadi melengkung. Momen dalam yang harus dimiliki oleh balok sehingga bisa menahan momen luar *ultimate* (M_u) ini yang terjadi dinyatakan dalam istilah Momen nominal (M_n) (Ishak dkk., 2014).

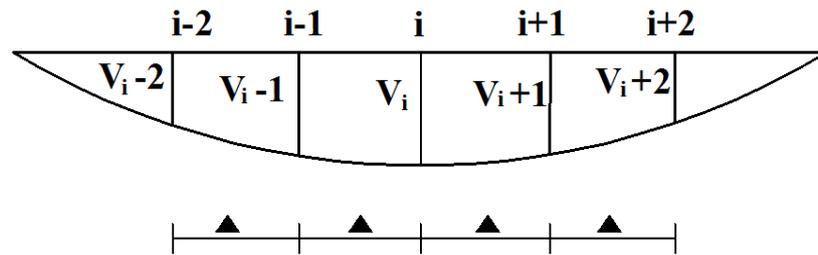


Gambar 2.32 Momen menentukan arah pelenturan yang terjadi (Ishak dkk., 2014).

Momen lentur (M) suatu kejadian dimana aksi dan reaksi tidak dalam satu garis kerja. Besarnya momen adalah perkalian gaya berat (P) dengan jarak (I) dari gaya ke titik yang ditinjau. Satuan momen adalah satuan gaya dikali satuan jarak. Momen disebut positif ($M+$) jika menyebabkan bendanya berputar menurut arah jarum jam, dan sebaliknya ($M-$) berlawanan arah jarum jam.

2.2.5. Kelengkungan

Menurut Park dan Pauley (1975) kelengkungan balok didapat dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial. Nilai kelengkungan dapat digunakan untuk mengetahui besarnya regangan pada saat terjadi lendutan (Popov, 1996) lendutan yang terjadi akan membentuk cekungan pada balok yang menerima beban. Pada Gambar 2.37 akan mengamsumsikan nilai kelengkungan ketika balok menerima beban.



Gambar 2.33 Kelengkungan balok (Puluhulawa, 2011).

$$\frac{1}{R} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \dots \dots \dots (2.47)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta} \dots \dots \dots (2.48)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta} \dots \dots \dots (2.49)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{V_i - V_{i-1}}{2\Delta} \dots \dots \dots (2.50)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{V_i - 2V_i + V_{i+1}}{\Delta^2} \dots \dots \dots (2.51)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{V_i - 2V_i + V_{i+1}}{\Delta^2} \dots \dots \dots (2.52)$$

Dengan :

$\frac{1}{R}$: nilai kelengkungan,

V_{i-1} : lendutan padat titik $i - 1$,

V_i : lendutan pada titik ke i ,

V_{i+1} : lendutan pada titik $i + 1$ dan

Δ : jarak antara titik lendutan.

2.2.6. Balok Melentur

Rahmat dan Satmoko (2012) balok melentur merupakan suatu batang yang dikenakan oleh beban-beban yang bekerja secara transversal terhadap sumbu pemanjangannya. Beban melentur ini menciptakan aksi internal, atau resultan tegangan dalam bentuk tegangan normal, tegangan geser dan momen lentur.

Beban samping (*lateral loads*) yang bekerja pada sebuah balok menyebabkan balok melengkung atau melentur, sehingga dengan demikian mendeformasikan sumbu balok menjadi suatu garis lengkung. Adapun tipe -tipe lenturan yaitu:

1. Lenturan Murni (*Pure Bending*)

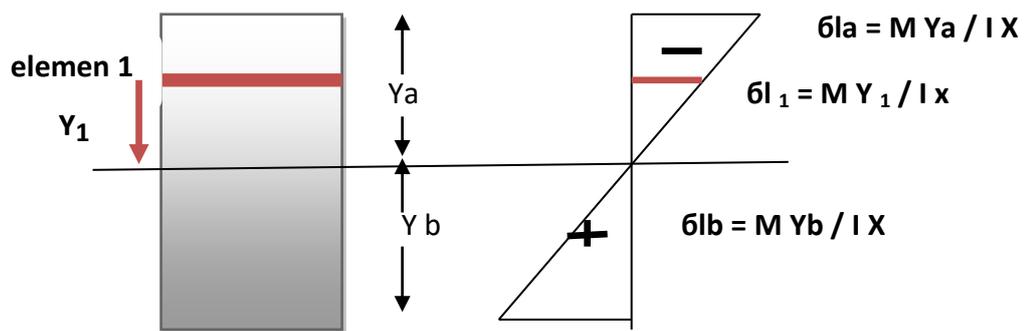
Lenturan murni dihasilkan oleh kopel dan tidak ada gaya geser transversal yang bekerja pada batang. Balok dengan lenturan ini hanya mempunyai tegangan normal atau tegangan lentur tarik dan tekan.

2. Lenturan Biasa (*Ordinary Bending*)

Lenturan biasa dihasilkan oleh gaya-gaya yang bekerja pada batang dan tidak terdapat kopel. Balok dengan lenturan ini mempunyai tegangan geser dan tegangan normal.

2.2.7. Tegangan Lentur

Tegangan lentur adalah suatu batang yang dikenakan oleh beban-beban yang bekerja secara transversal terhadap sumbu pemanjangnya. Beban-beban ini menciptakan aksi internal atau resultan tegangan. Beban samping (*lateral loads*) yang bekerja pada sebuah balok menyebabkan balok melengkung atau melentur, sehingga dengan demikian mendeformasikan sumbu balok menjadi suatu garis lengkung (Wibowo dkk., 2011).



Gambar 2.34 Diagram tegangan lentur (Wibowo dkk., 2011).

Secara umum untuk tegangan sejauh y dari garis netral:

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I_x} \dots \dots \dots (2.53)$$

dengan:

- σ : tegangan normal akibat lentur
- M : momen luar
- Y : jarak tegangan yang ditinjau ke garis netral
- I_x : momen inersia terhadap sumbu x

2.2.8. Lendutan dan Deformasi

Pada umumnya lendutan/defleksi balok perlu ditinjau agar tidak melampaui nilai tertentu, karena dapat terjadi dalam perancangan ditinjau dari segi kekuatan balok masih mampu menahan beban, namun lendutannya cukup besar sehingga tidak nyaman lagi. Perancangan yang mempertimbangkan batasan lendutan dinamakan perancangan berdasarkan kekakuan (*design for stiffness*). Selain didesain untuk menahan beban yang bekerja, suatu struktur juga dituntut untuk tidak mengalami lendutan yang berlebihan (*over deflection*) agar mempunyai kemampuan layan (*serviceability*) yang baik. Lendutan yang terjadi harus masih dalam batas yang diijinkan (*permissible deflection*). Semua balok akan terdefleksi (atau melendut) dari posisi awalnya apabila terbebani (paling tidak disebabkan oleh berat sendirinya). Dalam struktur bangunan, seperti : balok dan plat lantai tidak boleh melendut terlalu berlebihan (*over deflection*) untuk mengurangi kemampuan layan (*serviceability*) dan keamanannya (*safety*) yang akan mempengaruhi psikologis (ketakutan) pengguna (Zacoeb, 2014).

Deformasi adalah salah satu kontrol kestabilan suatu elemen balok terhadap kekuatannya. Biasanya deformasi dinyatakan sebagai perubahan bentuk elemen struktur dalam bentuk lengkungan dan perpindahan posisi dari titik di bentang balok ke titik lain, yaitu defleksi akibat beban di sepanjang bentang balok tersebut. Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi yaitu sebagai berikut ini.

1. Kekakuan batang

Semakin kaku suatu batang maka lendutan batang yang akan terjadi pada batang juga akan semakin kecil.

2. Besarnya kecil gaya yang diberikan

Semakin besar beban yang dialami batang maka defleksi yang terjadipun semakin kecil. Dengan kata lain besar-kecilnya suatu gaya yang diberikan pada batang akan berbanding lurus dengan besarnya defleksi yang terjadi.

3. Jenis tumpuan yang diberikan

Jumlah reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Jika karena itu besarnya defleksi pada penggunaan tumpuan yang berbeda-beda tidak sama. Semakin banyak reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban maka defleksi yang terjadi pada tumpuan rol lebih besar dari tumpuan pin (pasak) dan defleksi yang terjadi pada tumpuan pin lebih besar dari tumpuan jepit.

4. Jenis beban yang terjadi pada batang

Beban terdistribusi merata dengan beban titik, keduanya memiliki kurva defleksi berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata slope yang terjadi pada bagian batang yang paling dekat lebih besar dari slope titik, dikarenakan sepanjang batang mengalami beban sedangkan pada beban titik hanya terjadi pada beban titik tertentu saja.

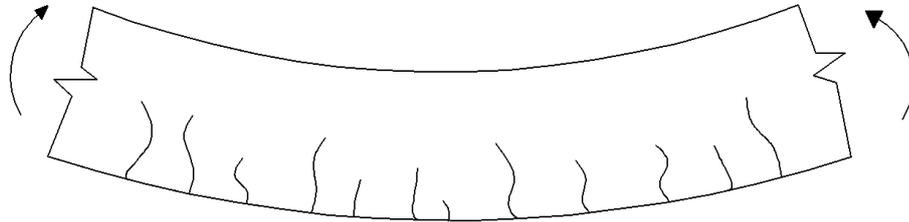
2.2.9. Pola Retak

Retak diakibatkan penurunan yang tidak seragam, susut, beban bertukar arah, perbedaan suhu unsur kimia dan unsur kimia. Pada kondisi di lapangan, variasi pola retak berbeda satu dengan lainnya. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan tegangan tarik yang ditimbulkan oleh beban, geser dan momen. Retak dimulai dari retak permukaan yang tidak dapat terlihat secara kasat mata. Apabila pembebanan diberikan secara terus menerus dapat mengakibatkan retak rambut yang merambat sampai pada akhirnya terjadi kegagalan atau keruntuhan pada struktur (Malini, 2008).

Pada balok yang memiliki tulangan memanjang diperlukan penulangan secara transversal atau biasa disebut dengan tulangan geser untuk mencegah pembentukan retak miring. Secara garis besar, terdapat tiga jenis keretakan pada balok, yakni:

1. Retak lentur (*flexural crack*)

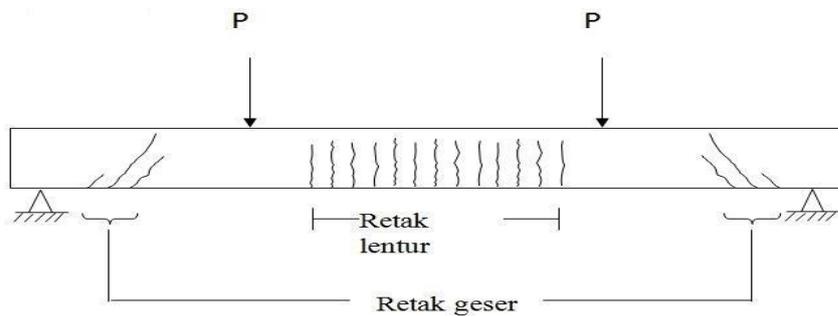
Retakan lentur ini terjadi hampir tegak lurus dengan daerah yang memiliki momen lentur yang besar.



Gambar 2.35 Retak lentur murni (Kholilul dkk., 2009).

2. Retak geser lentur (*flexural shear crack*)

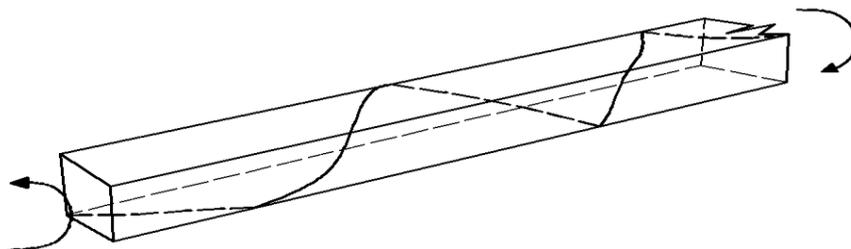
Bagian yang sebelumnya sudah terjadinya keretakan lentur balok. Bisa dikatakan bahwa retak geser lentur balok adalah perambatan diagonal dari retak lentur yang terjadi sebelumnya.



Gambar 2.36 Retak geser lentur (Kholilul dkk., 2009).

3. Retak Tarik diagonal (*web shear crack*)

Terjadinya retak Tarik diagonal pada garis netral balok. ini dikarenakan ketik gaya geser maksimum dan tegangan aksial yang terjadi sangat kecil.



Gambar 2.37 Retak torsi (Kholilul dkk., 2009)

2.2.10. Aplikasi *Response-2000*

Aplikasi *Response-2000* adalah suatu aplikasi yang dibuat berdasarkan *Modified Compression Field Theory* (MCFT) untuk elemen beton bertulang prisma. Aplikasi *Response-2000* merupakan program untuk menganalisis sifat-sifat balok dan kolom hasil yang didapat adalah momen, kelengkungan (*curvature*), lendutan (*defleksi*), tegangan geser (*shear strain*), gaya geser (*shear force*), beban aksial (*aksial load*) dan pola retak (*crack*). Menurut Amir (2008) Aplikasi *Response-2000* yang dikembangkan oleh Vecchio dan Benz (2000) adalah suatu aplikasi yang mempermudah untuk menganalisis balok yang dibebani oleh suatu gaya tertentu dengan kombinasi beban aksial, momen dan geser. Dalam penelitian yang dilakukan ini adalah pengujian dimana untuk mengetahui beban maksimum (*maximum load*), lendutan (*deflection*) dan momen lengkungan (*curvature*) pada pengujian balok girder menggunakan aplikasi *Response-2000*. Dari hasil pengujian tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa aplikasi *Response-2000* adalah aplikasi yang cukup akurat dalam menampilkan respon dari balok berupa prediksi. Berikut ini langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisis balok dengan menggunakan aplikasi *Response-2000*:

1. Klik aplikasi *Response-2000*
2. Kemudian Klik menu *Define* → *Quick define 1* yaitu bertujuan untuk memberi nama penelitian dan juga memilih mutu baja dan mutu beton. klik next.
3. *Define* → *Material Properties* menu ini untuk memasukan mutu material yang akan digunakan yaitu mutu beton (f_c') dan mutu baja (f_y)
4. *Define* → *Concrete Section* dalam menu ini pengguna bisa menentukan bentuk balok yang akan dianalisis dan memasukan dimensinya.
5. *Define* → *Transverse reinforcement* untuk memasukan diameter tulangan sengkang, jarak sengkang dan selimut beton, dengan langkah-langkah sebagai berikut ini.
 - a. *Name* di isi dengan nama sengkang
 - b. *Stirrup spacing* memasukkan angka jarak sengkang
 - c. *Bar Area* memasukkan luasan tulangan sengkang

- d. *Dist.to top* memasukan angka, jarak dari ujung beton bawah sampai ke as tulangan sengkang paling atas.
 - e. *Dist,to bottom* memasukan angka, jarak dari ujung beton bawah sampai ke as tulangan sengkang bawah.
 - f. *Bar Type* memasukan jenis sengkang yang akan digunakan, karena jenis sengkang tertutup maka dimasukkan *closed stirrup*.
 - g. *Rebar type* diisi long.
6. *Define* → *longitudinal reinforcemen* menu ini berfungsi untuk memasukan tulangan pokok. Langkah-langkah sebagai berikut ini.
 - a. *Name* memberi nama tulangan tersebut tulangan tarik maupun tulangan tekan.
 - b. *Number of bar* menu untuk memasukkan jumlah tulangan.
 - c. *Bar area* untuk memasukan luas tulangan per satu batang
 - d. *Dist, from bottom* memasukan angka, pada jarak berapakah tulangan tersebut dipasang, yaitu dihitung dari ujung balok paling bawah. Kemudian *klik add*, karena balok benda uji tulangan rangkap maka harus membuat dua jenis tulangan pokok dengan memasukan angka pada menu *Dist, from bottom* yang berbeda.
 7. *Load* → *load* menu ini untuk memasukan jenis pembebanan dan besar beban yang akan dimasukan kebenda uji, yaitu berupa beban aksial, momen dan shear.
 8. *Load* → *full member properties* menu untuk memasukan jenis pembebanan, jarak beban terpusat dan jenis tumpuan. karena kita hanya memakai beban merata dan tumpuan sendi rol maka kita hanya mengisi pada *lenght subjected to shear* dengan nilai setengah bentang benda uji, dan memasukan jenis tumpuan pada *left side properties* kita pilih *support on bottom*.
 9. *Solve* → *section response* untuk melihat respon balok dan deformasi benda uji hasil dari hasil analisis aplikasi *Response-2000*.
 10. *Solve* → *member response* menu ini untuk melihat hasil analisis dari data benda uji yang telah di input ke dalam langkah-langkah diatas yaitu berupa grafik *curvature distribution, deflection, shear strain distribution* dan *load* → *max deflection*

11. Mengambil data hasil analisis kita bisa mengcopy dengan cara *klik* dua kali pada grafik, maka akan muncul data dan kemudian *klik copy*.