

ANALISIS DAN EKSPERIMENAL PERHITUNGAN MOMEN-KURVATUR BALOK BETON BERTULANG

Pricillia Sofyan Tanuwijaya
NRP: 0621020

Pembimbing: Yosafat Aji Pranata, ST., MT.

ABSTRAK

Beton adalah material yang sering digunakan dalam struktur. Beton tidak dapat menahan gaya tarik melebihi nilai tertentu tanpa mengalami retak-retak. Untuk itu, agar beton dapat bekerja dengan baik dalam suatu sistem struktur, perlu dibantu dengan memberinya penulangan yang terutama akan memikul beban tarik yang bakal timbul di dalam sistem. Salah satu perilaku struktur beton bertulang yang penting untuk dipelajari adalah perilaku keruntuhannya.

Tujuan penelitian Tugas Akhir adalah mempelajari perilaku keruntuhan elemen struktur balok beton bertulang, diagram momen-kurvatur, dan diagram hubungan beban-peralihan; mempelajari dan membuat diagram hubungan momen-kurvatur dan beban-peralihan balok beton bertulang dengan metode numerik dan eksak; dan melakukan uji eksperimental balok beton bertulang.

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pada kondisi beban ultimit, model tegangan-regangan beton Hognestad dan tegangan-regangan baja lengkap memberikan prediksi paling mendekati terhadap terhadap eksperimental. Perangkat lunak *Response2000* memberikan prediksi beban, lendutan, dan pola penjalaran retak yang tidak berbeda jauh terhadap eksperimental. Metode eksak memberikan prediksi hubungan Beban-Lendutan yang lebih baik dibandingkan metode analitis. Perilaku balok adalah daktail, hal ini terlihat dari hubungan beban-lendutan yang terjadi, yaitu perilaku setelah elastik, balok mengalami deformasi yang besar sebelum runtuh. Dari hasil uji eksperimental pada penelitian ini diperoleh modulus ruptur (f_r) sebesar 2,681 MPa. Hal ini memberikan perbedaan %-relatif berkisar antara 43%-47% terhadap prediksi analisis dan *Response2000*.

Kata kunci: Balok beton bertulang, Momen-Kurvatur, Metode numerik, Metode eksak, Uji eksperimental, *Strain Gauge*.

ANALYSIS AND EXPERIMENTAL OF MOMENT-CURVATURE COMPUTATION ON REINFORCED CONCRETE BEAM

Pricillia Sofyan Tanuwijaya
NRP: 0621020

Supervisor: Yosafat Aji Pranata, ST., MT.

ABSTRACT

Concrete is a familiar material used in structure. Concrete can't resist the tensile stress beyond certain value without cracking. So, reinforced steel used to resist tensile stress that will occur in a structures. One of the most important study for behavior of reinforced concrete is a failure behavior.

The objectives of this research are study the failure behavior of reinforced concrete beam, Moment-Curvature relationship, and Load-Deformation relationship; develop Moment-Curvature and Load-Deflection diagrams of reinforced concrete beam using numerical and exact method; and verify this analytical prediction using experimental test in laboratory.

Results obtained from this research indicated that at ultimate load, hognestad concrete stress-strain model and complete steel stress-strain model give more accurate prediction against experimental test results. Response2000 software give accurate prediction for load, displacement, and crack propagation against experimental test results. Exact method give more better load-displacement prediction than analytical method. Beam behavior is ductile, beam have long deformation performance before collapse. Modulus of rupture obtained from experimental test is 2.681 MPa. This result indicated that %-relative difference range from 43%-47% against analytical and Response2000 predictions.

Keywords: Reinforced concrete beam, Moment-curvature, Numeric method, Exact method, Experimental, *Strain gauge*.

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Surat Keterangan Tugas Akhir	ii
Surat Keterangan Selesai Tugas Akhir	iii
Lembar Pengesahan	iv
Pernyataan Orisinalitas Laporan Tugas Akhir	v
Abstrak	vi
Abstract	vii
Prakata	viii
Daftar Isi	xi
Daftar Gambar	xiii
Daftar Tabel	xiv
Daftar Notasi	xviii
Daftar Lampiran	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.4 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Beton	6
2.1.1 Material Penyusun Beton	7
2.1.2 Sifat Beton	9
2.1.3 Hubungan Tegangan-Regangan Beton	10
2.1.4 Modulus Elastisitas Beton	13
2.1.5 Kuat Tekan Beton	15
2.2 Baja	16
2.2.1 Material Penyusun Baja	16
2.2.2 Jenis Baja	17
2.2.3 Sifat Baja	18
2.2.4 Hubungan Tegangan-Regangan Baja	18
2.3 Elemen Struktur Balok Beton Bertulang	21
2.4 Hubungan Momen-Kurvatur	22
2.4.1 Beton Pertama Retak (<i>First Crack</i>)	22
2.4.2 Tulangan Baja Leleh Pertama (<i>First Yield</i>)	23
2.4.3 Kondisi Setelah Leleh (<i>Post Yield</i>)	25
2.4.4 Metode Numerik	28
2.5 Statika dan Mekanika Bahan	28
2.5.1 Struktur Statis Tertentu	29
2.5.2 Gaya-gaya Dalam (Gaya Internal)	30
2.6 Hubungan Beban-Lendutan	30
2.6.1 Metode Eksak	32

2.6.2 Metode Analitis	34
2.7 <i>Mix Design</i>	35
2.8 Metode Numerik <i>Bi-Section</i>	37
2.9 Perangkat Lunak <i>Response2000</i>	39
2.10 <i>Strain Gauge</i>	41
2.11 Metodologi Penelitian	43
BAB III STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN	47
3.1 Studi Kasus	47
3.2 Perhitungan Momen-Kurvatur	48
3.2.1 Model Tegangan-Regangan A	48
3.2.2 Model Tegangan-Regangan B	50
3.2.3 Model Tegangan-Regangan C	52
3.3 Perhitungan Beban-Lendutan dengan Metode Eksak	54
3.3.1 Model AN	54
3.3.2 Model BN	56
3.3.3 Model CN	58
3.4 Perhitungan Beban-Lendutan dengan Metode Analitis	60
3.4.1 Model AA	60
3.4.2 Model BA	61
3.4.3 Model CA	62
3.5 Perhitungan dengan Perangkat Lunak	63
3.5.1 Langkah-langkah Perhitungan dengan <i>Response2000</i>	63
3.5.2 Hasil Perhitungan	69
3.6 Uji Eksperimental	76
3.6.1 Persiapan Bekisting	76
3.6.2 Persiapan Material	77
3.6.3 Persiapan Pengecoran	79
3.6.4 Perawatan	80
3.6.5 Pengujian	81
3.7 Pembahasan	86
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN	91
4.1 Kesimpulan	91
4.2 Saran	92
Daftar Pustaka	93
Lampiran	94

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Balok yang Dibebani Sampai Runtuh	2
Gambar 1.2	Kurva Momen-Kurvatur	3
Gambar 2.1	Diagram Tegangan-Regangan Beton	10
Gambar 2.2	Hubungan Tegangan-Regangan Uniaksial Beton	11
Gambar 2.3	Hubungan Tegangan-Regangan Beton.....	12
Gambar 2.4	Modulus Tangen dan Sekan Beton.....	14
Gambar 2.5	Hubungan Tegangan-Regangan Baja.....	19
Gambar 2.6	Hubungan Tegangan-Regangan Baja.....	20
Gambar 2.7	Beton Pertama Retak	22
Gambar 2.8	Baja Leleh Pertama Model Sozen	23
Gambar 2.9	Baja Leleh Pertama Model Hognestad.....	24
Gambar 2.10	Luas Semisegmen Parabola.....	24
Gambar 2.11	Baja Setelah Leleh Model Sozen.....	25
Gambar 2.12	Baja Setelah Leleh Model Hognestad	26
Gambar 2.13	Diagram Tegangan Sozen Setelah Leleh.....	26
Gambar 2.14	Diagram Tegangan Hognestad Setelah Leleh	27
Gambar 2.15	Balok Statis Tertentu	29
Gambar 2.16	Perilaku Beban-Lendutan Beton.....	31
Gambar 2.17	Ilustrasi Metode Momen Area.....	33
Gambar 2.18	Balok Dibagi Menjadi 18 Segmen	34
Gambar 2.19	Balok dengan Berat Sendiri.....	34
Gambar 2.20	Metode <i>Bi-section</i>	38
Gambar 2.21	Tegangan-Regangan Beton <i>Response2000</i>	40
Gambar 2.22	Tegangan-Regangan Baja <i>Response2000</i>	41
Gambar 2.23	<i>Symmetric Beam</i>	41
Gambar 2.24	<i>Strain Gauges</i> Baja yang Digunakan	42
Gambar 2.25	<i>Strain Gauges</i> Beton yang Dipasang pada Serat Terluar Balok Beton	42
Gambar 2.26	<i>Slot</i> Kabel Sensor <i>Strain Gauges</i> pada DC104R <i>Controller</i> ..	43
Gambar 2.27	Bagan Alir Penelitian	44
Gambar 3.1	Penampang Balok.....	47
Gambar 3.2	Kurva Momen Kurvatur Model Tegangan-Regangan A.....	48
Gambar 3.3	Kurva Momen Kurvatur Model Tegangan-Regangan B.....	50
Gambar 3.4	Kurva Momen Kurvatur Model Tegangan-Regangan C.....	52
Gambar 3.5	Kurva Kurvatur-Bentang Model AN.....	54
Gambar 3.6	Kurva Beban-Lendutan Model AN	55
Gambar 3.7	Kurva Kurvatur-Bentang Model BN	56
Gambar 3.8	Kurva Beban-Lendutan Model BN	57
Gambar 3.9	Kurva Kurvatur-Bentang Model CN	58
Gambar 3.10	Kurva Beban-Lendutan Model CN	59
Gambar 3.11	Kurva Beban-Lendutan Model AA	61
Gambar 3.12	Kurva Beban-Lendutan Model BA	62
Gambar 3.13	Kurva Beban-Lendutan Model CA	63

Gambar 3.14	<i>General Definitions</i>	63
Gambar 3.15	<i>Basic Properties</i>	64
Gambar 3.16	<i>Concrete Details</i>	65
Gambar 3.17	<i>Rebar Details</i>	65
Gambar 3.18	Penampang dan Dimensi Balok.....	66
Gambar 3.19	Penampang Balok dan Tulangan	67
Gambar 3.20	<i>Define Transverse Reinforcement</i>	67
Gambar 3.21	<i>Define Longitudinal Reinforcement</i>	68
Gambar 3.22	<i>Define Loading</i>	69
Gambar 3.23	<i>Full Member Properties</i>	69
Gambar 3.24	<i>Sectional Response</i>	70
Gambar 3.25	<i>Member Response</i>	71
Gambar 3.26	<i>Moment-Curvatur Response2000</i>	72
Gambar 3.27	Kurva Beban-Lendutan Analitis dan <i>Response2000</i>	75
Gambar 3.28	Tampak 3D Bekisting.....	76
Gambar 3.29	Tampak Samping Bekisting	76
Gambar 3.30	Permukaan Tulangan Diampelas Untuk Menempatkan <i>Strain Gauge</i>	77
Gambar 3.31	<i>Strain Gauge</i> di lem Menggunakan <i>Power Glue</i>	78
Gambar 3.32	<i>Strain Gauge</i> Telah Dilem.....	78
Gambar 3.33	<i>Strain Gauge</i> Diberi Selotip	78
Gambar 3.34	<i>Strain Gauge</i> Diberi Aspal	79
Gambar 3.35	Tes <i>Slump</i>	79
Gambar 3.36	Adonan Beton Dicitak Dalam Bekisting	80
Gambar 3.37	Balok Telah Dicitak	80
Gambar 3.38	Balok Dipasang <i>Strain Gauge</i> Beton	81
Gambar 3.39	<i>Universal Testing Machine</i>	81
Gambar 3.40	Balok Diset pada Alat Uji.....	82
Gambar 3.41	Kabel <i>Strain Gauge</i> Baja dan Beton	82
Gambar 3.42	<i>DC104R Controller</i>	82
Gambar 3.43	Beban Terpusat Dibagi Menjadi Dua Beban Terpusat.....	83
Gambar 3.44	Komputer yang Membaca <i>DC104R Controller</i> dan UTM.....	83
Gambar 3.45	Kurva Beban-Lendutan Hasil Uji Eksperimental.....	84
Gambar 3.46	Kurva Beban-Waktu Hasil Uji Eksperimental	84
Gambar 3.47	Kurva Regangan-Waktu Tulangan Baja Hasil Uji Eksperimental	84
Gambar 3.48	Kurva Beban-Regangan Baja Hasil Hasil Bacaan <i>Strain Gauges</i>	85
Gambar 3.49	Kurva Beban-Regangan Secara Umum.....	85
Gambar 3.50	Kurva Momen-Kurvatur Gabungan	86
Gambar 3.51	Kurva Momen-Regangan Gabungan.....	86
Gambar 3.52	Kurva Beban-Lendutan Gabungan.....	88
Gambar L1.1	Model Tegangan-Regangan Beton A Pertama Retak.....	95
Gambar L1.2	Model Tegangan-Regangan Beton A Pertama Leleh.....	97
Gambar L1.3	Interpolasi Tegangan	97
Gambar L2.1	Hubungan Momen-Bentang Model AN	111
Gambar L2.2	Kurva Kurvatur-Bentang Model AN.....	114
Gambar L2.3	Luasan Kurvatur-Bentang Segmen 1.....	115

Gambar L2.4 Luasan Kurvatur-Bentang Segmen 7.....	115
Gambar L3.1 Penampang balok.....	117
Gambar L3.2 Penampang Balok Tulangan Ganda dan Distribusi Tegangan-Regangan	117
Gambar L3.3 Distribusi Tegangan dan Regangan Balok Asumsi	118
Gambar L3.4 Distribusi Tegangan dan Regangan Balok Sebenarnya.....	119
Gambar L4.1 Kurva Distribusi Ukuran Butir Agregat Halus	128
Gambar L4.2 Hasil Uji Tekan Silinder	132
Gambar L6.1 Kurva Tegangan-Regangan Baja Hasil Uji Tarik	137
Gambar L6.2 <i>Output</i> MINITAB	137
Gambar L6.3 Pola Retak Balok	138
Gambar L6.4 Bekisting Balok	139
Gambar L6.5 Tulangan Baja Diamplas	139
Gambar L6.6 <i>Strain Gauges</i> Dilem pada Tulangan Baja	140
Gambar L6.7 <i>Strain Gauges</i> Dilapisi Solatip	140
Gambar L6.8 <i>Strain Gauges</i> Dilapisi Aspal	140
Gambar L6.9 Bekisting Dilapisi Oli	141
Gambar L6.10 Tulangan Dimasukkan dalam Bekisting.....	141
Gambar L6.11 Material yang Digunakan	141
Gambar L6.12 Material Dicampur dalam Molen	142
Gambar L6.13 Tes <i>Slump</i>	142
Gambar L6.14 Campuran Beton Dicitak dalam Bekisting	142
Gambar L6.15 Beton Telah Dicitak	143
Gambar L6.16 Beton Silender	143
Gambar L6.17 Pengujian Silinder	143
Gambar L6.18 Pengujian Silinder dengan UTM	144
Gambar L6.19 Balok Diset pada UTM.....	144
Gambar L6.20 Balok Setelah Diuji	144
Gambar L6.21 Balok Setelah Diuji 2.....	145
Gambar L6.22 Pola Retak Balok	145

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pemodelan dalam Perhitungan	28
Tabel 2.2	Perhitungan Beban-Lendutan dengan Berbagai Pendekatan..	32
Tabel 3.1	Hasil Perhitungan Momen-Kurvatur Model Tegangan-Regangan A	49
Tabel 3.2	Hasil Perhitungan Momen Kurvatur Model Tegangan-Regangan B	51
Tabel 3.3	Hasil Perhitungan Momen-Kurvatur Model Tegangan-Regangan C	53
Tabel 3.4	Hubungan Momen-Kurvatur-Bentang Model AN	54
Tabel 3.5	Beban-Lendutan Model AN	56
Tabel 3.6	Hubungan Momen-Kurvatur-Bentang Model BN.....	56
Tabel 3.7	Beban-Lendutan Model BN	58
Tabel 3.8	Hubungan Momen-Kurvatur-Bentang Model CN.....	59
Tabel 3.9	Beban-Lendutan Model CN	60
Tabel 3.10	Beban-Lendutan Model AA	61
Tabel 3.11	Beban-Lendutan Model BA	61
Tabel 3.12	Beban-Lendutan Model CA	62
Tabel 3.13	<i>Output</i> Momen-Kurvatur <i>Response2000</i>	72
Tabel 3.14	<i>Output</i> Kurvatur-Bentang <i>Response2000</i>	73
Tabel 3.15	<i>Output</i> Bentang-Lendutan <i>Response2000</i>	74
Tabel 3.16	<i>Output</i> Beban-Lendutan <i>Response2000</i>	74
Tabel 3.17	%-Relatif Perbedaan Momen Kondisi Beton Pertama Retak Terhadap Hasil Uji Eksperimental	87
Tabel 3.18	%-Relatif Perbedaan Momen Kondisi Baja Pertama Leleh Terhadap Hasil Uji Eksperimental	87
Tabel 3.19	%-Beda Momen Saat Regangan Baja 0,01524 mm/mm Terhadap Hasil Uji Eksperimental	87
Tabel 3.20	%-Relatif Perbedaan <i>P</i> Eksak, Analitis dan <i>Response2000</i> dengan Uji Eksperimental	88
Tabel 3.21	%-Relatif Perbedaan Lendutan Eksak dan <i>Response2000</i> Uji Eksperimental.....	89
Tabel 3.22	%-Relatif Perbedaan Lendutan Analitis dan <i>Response2000</i> dengan Uji Eksperimental	89
Tabel 3.23	%-Relatif Perbedaan Modulus Ruptur (f_r) Analitis dan Perangkat Lunak dengan Uji Eksperimental	90
Tabel L1.1	Mencari Nilai <i>c</i> dengan Metode Numerik <i>Bi-section</i>	99
Tabel L2.1	Perhitungan Lendutan Model AN	114
Tabel L4.1	Penurunan Semen Bergantung pada % Air	122
Tabel L4.2	Penurunan Semen dengan Prosentase Air 27 %	123
Tabel L4.3	Warna Larutan	124
Tabel L4.4	Penyerapan Agregat Halus	124
Tabel L4.5	<i>Bulking Factor</i>	125
Tabel L4.6	Kadar Air	126
Tabel L4.7	Kadar Lumpur dan Kadar Lempung.....	126

Tabel L4.8	<i>Specific Gravity</i>	127
Tabel L4.9	Analisis Ayak Agregat Halus	127

DAFTAR NOTASI

A_s	= Luas tulangan tarik, mm ² .
A_s'	= Luas tulangan tekan, mm ² .
b	= Lebar penampang, mm.
b_w	= Lebar web, mm.
c	= Jarak serat tertekan ke sumbu netral, mm.
C_c	= Gaya tekan pada penampang beton, N.
C_s	= Gaya tekan pada penampang beton akibat tulangan tekan, N.
d	= Tinggi efektif penampang, jarak serat tekan ke pusat tulangan tarik, mm.
d'	= Jarak dari serat tekan ke pusat tulangan tekan, mm.
E_c	= Modulus elastisitas beton, MPa.
E_s	= Modulus elastisitas baja, MPa.
f'_c	= Kuat tekan beton pada umur 28 hari, MPa.
f'_{cr}	= Kuat tekan rata-rata yang direncanakan, MPa.
f_{cr}	= Kuat tarik langsung, MPa.
f_{cu}	= Kuat tekan beton pada kondisi ultimit
f_r	= Modulus keruntuhan, MPa.
f_s	= Tegangan baja pada kondisi beban kerja, MPa.
f'_t	= Kuat tarik beton, MPa.
f_y	= Kuat leleh baja tulangan, MPa.
h	= Tinggi penampang, mm.
I	= Momen inersia penampang, mm ⁴ .
L	= Panjang bentang, m.

- M_{retak} = Momen pada saat pertama kali retak, Nmm.
- n = Rasio modulus.
- P = Beban, kg.
- s = Deviasi standar.
- S_r = Deviasi standar rencana.
- T = Gaya tarik pada penampang beton akibat tulangan tarik, N.
- $t_{A/B}$ = Deviasi tangensial B terhadap A pada teorema luas momen kedua.
- w = Kerapatan beton, kg/m³.
- W_h = Perkiraan jumlah air untuk agregat halus.
- W_k = Perkiraan jumlah air untuk agregat kasar.
- \bar{y} = Jarak titik berat penampang ke sisi atas penampang, mm.
- y_{bottom} = Jarak titik berat penampang ke sisi bawah penampang, mm.
- δ = Lendutan, mm.
- ϵ_c = Regangan beton.
- ϵ_s = Regangan baja.
- ϵ_{cu} = Regangan beton pada kondisi ultimit.
- γ_{beton} = Berat jenis beton, kg/m³
- φ_{retak} = Kurvatur, kelengkungan, rad/mm.
- ρ = rasio tulangan tarik.
- ρ' = rasio tulangan tekan.
- $\theta_{B/A}$ = Sudut antara garis singgung A dan B pada teorema luas momen pertama.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran L1	Perhitungan Momen-Kurvatur.....	94
Lampiran L2	Perhitungan Beban-Lendutan Numerik.....	109
Lampiran L3	<i>Preliminary Design</i> Balok.....	117
Lampiran L4	Hasil Analisis Semen dan Agregat serta Perhitungan <i>Mix Design</i>	121
Lampiran L5	ASTM 04.02.....	133
Lampiran L6	Hasil Uji Eksperimental	137