

PEMODELAN NUMERIK METODE ELEMEN HINGGA NONLINIER STRUKTUR BALOK TINGGI BETON BERTULANG

Jhony
NRP: 0721003

Pembimbing: Yosafat Aji Pranata, ST., MT.

ABSTRAK

Balok tinggi adalah balok yang mempunyai rasio bentang (L) dan tinggi balok (h) yang kecil. Perilaku dan karakteristik balok tinggi sangat berbeda dengan perilaku dan karakteristik balok yang mempunyai perbandingan normal. Pada balok tinggi akan dominan terjadi keruntuhan akibat tegangan geser. Balok beton bertulang yang diuji mempunyai perbandingan bentang dan tinggi sebesar $2,25 \div 0,8 = 2,8125$, lebih besar dari 2,5 sehingga menurut kriteria ACI 318 - 99 sebenarnya belum termasuk kategori balok tinggi. Meskipun demikian dari perilaku keruntuhan yang diperlihatkan yaitu keruntuhan geser (*diagonal splitting*) maka dapat dikategorikan sebagai balok tinggi (*deep-beam*), yang mana perilakunya sangat berbeda dengan tipe balok biasa karena bukan keruntuhan lentur.

Tujuan penelitian Tugas Akhir ini adalah mempelajari perilaku keruntuhan balok tinggi beton bertulang dengan mutu beton yang digunakan adalah $f_c = 37,125$ MPa dan mutu baja yang digunakan adalah $f_y = 292,19$ MPa, $f_y = 333,1707$ MPa, dan $f_y = 465,8067$ MPa [Hardjasaputra, 2005]. Penelitian numerik dilakukan dengan perangkat lunak ADINA.

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa pada tinjauan beban elastis, model balok numerik lebih kaku daripada eksperimen. Pada beban batas proporsional, model balok eksperimental lebih kaku. Beban ultimit model balok numerik lebih besar daripada eksperimental.

Kata kunci: Tegangan geser, *Deep-beam*, *Diagonal splitting*.

NUMERICAL MODELING OF NONLINEAR FINITE ELEMENT METHOD ON REINFORCED CONCRETE DEEP BEAM

Jhony
NRP: 0721003

Supervisor: Yosafat Aji Pranata, ST., MT.

ABSTRACT

High beam is a beam that has a ratio of span (L) and high (h) is small. Behavior and characteristics of the high beam is very different from the behavior and characteristics of the beam that have a normal ratio. At high beam will be dominant failure occurred due to shear stress. Reinforced concrete beams have been tested and high-span ratio of $2.25 \div 0.8 = 2.8125$, larger than 2.5, so according to the criteria of ACI 318-99 is actually not include the category of high beams. Nevertheless from the collapse of the behavior shown that shear failure (*diagonal splitting*) it can be categorized as a high beam (*deep-beam*), which behavior is very different from the ordinary beam type because no flexural.

The purpose of this final research is to study the collapse of the behavior of reinforced concrete beams with the quality of concrete used is $f_c = 37.125$ MPa and quality of steel used is $f_y = 292.19$ MPa, $f_y = 333.1707$ MPa, and $f_y = 465.8067$ MPa [Hardjasaputra, 2005]. Numerical investigation carried out by ADINA software.

The results of this study showed that, in a review of elastic load, the numerical beam model is stiffer than the experiment. In the proportional limit load, model of experimental beam is more rigid. Ultimate load beam model numerically larger than the experimental.

Keywords: Shear stress, *Deep-beam*, *Diagonal splitting*.

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
Pernyataan Publikasi Laporan Penelitian	vi
Abstrak	vii
<i>Abstract</i>	viii
Kata Pengantar	ix
Daftar Isi	xi
Daftar Gambar	xiii
Daftar Tabel	xvi
Daftar Notasi	xvii
Daftar Lampiran	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	2
1.4 Sistematika Penulisan	2
1.5 Metodologi Penelitian	2

BAB II TINJAUAN LITERATUR

2.1 Beton Bertulang	4
2.2 Material Beton Bertulang	5
2.2.1 Material Beton	5
2.2.2 Kelebihan dan Kekurangan Material Beton	6
2.2.3 Hubungan Tegangan-Regangan Beton	7
2.2.4 Modulus Elastisitas Beton	9
2.2.5 Material Baja	11
2.2.6 Hubungan Tegangan-Regangan Baja	12
2.3 Elemen Struktur Balok Beton Bertulang	17
2.3.1 Klasifikasi Balok	17
2.3.2 Balok Tinggi	18
2.4 Metode Elemen Hingga	18
2.4.1 Perangkat Lunak ADINA	19
2.4.2 Material Elastis Nonlinier	21
2.4.3 Elemen <i>Solid</i> 3D	22
2.4.4 Elemen <i>Truss</i>	24
2.5 Metode <i>Strut-and-Tie Model</i>	27
2.5.1 Perkembangan Metode <i>Strut-and-Tie Model</i>	27
2.5.2 Dasar Teori	28

2.5.3 <i>Strut</i>	30
2.5.4 <i>Tie</i>	32
2.5.5 <i>Nodes</i> dan <i>Nodal Zones</i>	33
2.5.6 Metode Penentuan <i>Strut-and-Tie</i>	35
2.6 Tulangan Geser	36
2.7 Titik Leleh.....	38

BAB III STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

3.1 Studi Kasus Data Struktur Balok	39
3.2 Pemodelan Numerik.....	40
3.2.1 Pemodelan Material Beton.....	41
3.2.2 Pemodelan Material Baja	43
3.2.3 Pemodelan Struktur Balok	53
3.2.4 Pendefinisian <i>Mesh</i>	55
3.2.5 Pemodelan Beban.....	57
3.2.6 Pemodelan Tumpuan	61
3.3 Perhitungan Analitis dengan Metode <i>Strut-And-Tie Model</i>	63
3.3.1 Perhitungan Kekuatan Area Titik Nodal.....	64
3.3.2 Perhitungan Kekuatan <i>Strut</i> BC dan <i>Tie</i> AD	65
3.3.3 Perhitungan Kekuatan <i>strut</i> AB	67
3.4 Perhitungan Analitis untuk Perencanaan Tulangan Geser	68
3.5 Pembahasan.....	69
3.5.1 Kurva Beban-Lendutan	69
3.5.2 Nilai P_{yield}	70
3.5.3 Nilai $P_{ultimate}$	72
3.5.4 Peralihan Arah Sumbu-z	73
3.5.5 Regangan Arah Sumbu-x	76
3.5.6 Simulasi Keruntuhan Balok Tinggi	82
3.5.7 Tegangan Pada <i>Strut</i> Diagonal AB	84

BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan	86
4.2 Saran	87

Daftar Pustaka	88
-----------------------------	-----------

Lampiran	89
-----------------------	-----------

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Bagan alir studi	3
Gambar 2.1	Diagram tegangan-regangan beton	8
Gambar 2.2	Hubungan tegangan-regangan <i>uniaxial</i> beton.....	8
Gambar 2.3	Diagram tegangan-regangan beton <i>Hognested</i>	9
Gambar 2.4	Modulus tangent dan sekan beton	10
Gambar 2.5	Idealisasi kurva tegangan-regangan material baja	13
Gambar 2.6	Hubungan tegangan-regangan baja	14
Gambar 2.7	Perilaku tegangan-regangan dari model material nonlinier elastis.....	21
Gambar 2.8	Material elastis nonlinier untuk elemen <i>truss</i>	22
Gambar 2.9	Tipe-tipe elemen <i>solid</i> 3D.....	23
Gambar 2.10	Elemen <i>truss</i> dengan titik nodal.....	24
Gambar 2.11	Gaya-gaya pada elemen <i>truss</i>	25
Gambar 2.12	Penomoran titik nodal lokal pada elemen <i>truss</i>	26
Gambar 2.13	Lokasi titik yang terintegrasi.....	26
Gambar 2.14	Daerah B dan D.....	27
Gambar 2.15	Balok tinggi.....	28
Gambar 2.16	Pemodelan <i>strut and tie</i> pada balok tinggi.....	29
Gambar 2.17	<i>Strut</i> bentuk <i>bottle shape</i>	30
Gambar 2.18	Berbagai bentuk <i>strut</i>	31
Gambar 2.19	Kekuatan <i>strut</i>	31
Gambar 2.20	Tulangan kontrol retak menyilang pada sebuah <i>strut</i> dalam jaringan yang retak	31
Gambar 2.21	Berbagai bentuk <i>node</i>	34
Gambar 2.22	Metode umum untuk analisis titik leleh.....	38
Gambar 3.1	Detail dimensi dan penulangan balok tinggi	40
Gambar 3.2	Potongan A-A dan B-B pada balok	40
Gambar 3.3	Pemodelan properti material beton pada ADINA untuk model numerik 1 dan model numerik 2	42
Gambar 3.4	Pemodelan material beton pada ADINA.....	43
Gambar 3.5	Pemodelan properti material baja tulangan diameter 22 mm pada ADINA model N1.....	44
Gambar 3.6	Pemodelan properti material baja tulangan diameter 10 mm pada ADINA model N1.....	45
Gambar 3.7	Pemodelan properti material baja tulangan diameter 8 mm pada ADINA model N1.....	46
Gambar 3.8	Pendefinisian grup elemen material baja tulangan diameter 22 mm.....	47
Gambar 3.9	Pendefinisian grup elemen material baja tulangan diameter 10 mm.....	47
Gambar 3.10	Pendefinisian grup elemen material baja tulangan diameter 8 mm.....	48

Gambar 3.11 Pemodelan properti material baja tulangan diameter 21,76 mm pada ADINA model N2.....	49
Gambar 3.12 Pemodelan properti material baja tulangan diameter 10,57 mm pada ADINA model N2.....	50
Gambar 3.13 Pemodelan properti material baja tulangan diameter 6,93 mm pada ADINA model N2.....	51
Gambar 3.14 Pendefinisian grup elemen material baja tulangan diameter 21,76 mm.....	52
Gambar 3.15 Pendefinisian grup elemen material baja tulangan diameter 10,57 mm.....	52
Gambar 3.16 Pendefinisian grup elemen material baja tulangan diameter 6,93 mm.....	53
Gambar 3.17 Pendefinisian <i>body</i> 1 struktur balok.....	53
Gambar 3.18 Hasil pemodelan <i>body</i> 1	54
Gambar 3.19 Hasil pemodelan struktur balok	54
Gambar 3.20 Pendefinisian <i>mesh density</i> elemen 3-D <i>solid</i>	55
Gambar 3.21 <i>Mesh</i> pada elemen 3-D <i>solid</i>	55
Gambar 3.22 <i>Mesh</i> pada elemen <i>truss</i>	56
Gambar 3.23 Hasil <i>mesh</i> pada elemen 3-D <i>solid</i> model N1 dan N2	56
Gambar 3.24 Hasil <i>mesh</i> pada elemen <i>truss</i> model N1 dan N2.....	57
Gambar 3.25 Pendefinisian nilai <i>time step</i>	58
Gambar 3.26 Pendefinisian nilai <i>time function</i>	58
Gambar 3.27 Pengaturan literasi perangkat lunak ADINA	59
Gambar 3.28 Menentukan nilai toleransi untuk literasi.....	60
Gambar 3.29 Input nilai beban model N1.....	60
Gambar 3.30 Input nilai beban model N2.....	61
Gambar 3.31 Pemodelan beban ADINA.....	61
Gambar 3.32 Pendefinisian tumpuan ADINA	62
Gambar 3.33 Hasil pemodelan tumpuan ADINA.....	63
Gambar 3.34 Model balok tinggi	64
Gambar 3.35 Model <i>strut-and-Tie</i> untuk desain.....	64
Gambar 3.36 Perencanaan kekuatan <i>strut</i> dan <i>tie</i>	65
Gambar 3.37 Detail titik A dan B	67
Gambar 3.38 Kurva hubungan antara beban-lendutan.....	70
Gambar 3.39 Nilai P_{yield} hasil eksperimental	71
Gambar 3.40 Nilai P_{yield} hasil ADINA model N1	71
Gambar 3.41 Nilai P_{yield} hasil ADINA model N2	72
Gambar 3.42 Nilai $P_{ultimate}$ hasil eksperimental dan ADINA.....	73
Gambar 3.43 Notasi penomoran LVDT pada balok	74
Gambar 3.44 Peralihan sumbu-z pada ADINA	74
Gambar 3.45 Output nilai sumbu-z pada ADINA model N1	75
Gambar 3.46 Output nilai sumbu-z pada ADINA model N2	75
Gambar 3.47 Gambar notasi penomoran <i>strain gauge</i> pada balok.....	76
Gambar 3.48 Regangan sumbu-x pada ADINA model N1	77
Gambar 3.49 Regangan sumbu-x pada ADINA model N1	77
Gambar 3.50 Output nilai regangan sumbu-x elemen 1463 pada ADINA model N1	78

Gambar 3.51 Output nilai regangan sumbu-x elemen 2224 pada ADINA model N2	72
Gambar 3.52 Output nilai regangan sumbu-x elemen 1463 pada ADINA model N1	80
Gambar 3.53 Output nilai regangan sumbu-x elemen 2224 pada ADINA model N2	81
Gambar 3.54 Retak hasil eksperimental	82
Gambar 3.55 Retak hasil simulasi ADINA model N1.....	83
Gambar 3.56 Retak hasil simulasi ADINA model N2.....	83
Gambar 3.57 Detail kontur tegangan pada <i>strut</i> AB model N1.....	84
Gambar 3.58 Detail kontur tegangan pada <i>strut</i> AB model N2.....	85
Gambar L1.1 Balok yang ditinjau.....	89
Gambar L1.2 Potongan 1	90
Gambar L2.1 Bekisting dan tulangan balok yang telah dirakit.....	92
Gambar L2.2 Pemasangan <i>strain gauge</i> pada tulangan balok	92
Gambar L2.3 Rencana siklus pembebanan balok uji.....	93
Gambar L2.4 Bentuk keruntuhan benda uji silinder beton	96
Gambar L2.5 Kurva regangan-tegangan beton	100
Gambar L2.6 Rekaman diagram gaya perpanjangan baja tulangan.....	101
Gambar L2.7 Kondisi putus tulangan ulir.....	102
Gambar L2.8 Pola retak balok tinggi	102
Gambar L2.9 Notasi penomoran LVDT pada balok uji.....	103
Gambar L2.10Notasi penomoran <i>strain gauge</i> balok uji.....	105

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Diameter baja tulangan yang digunakan.....	43
Tabel 3.2	Perbandingan nilai P_{yield} antara hasil eksperimental dengan ADINA	72
Tabel 3.3	Perbandingan nilai $P_{ultimate}$ antara hasil eksperimental dengan ADINA	73
Tabel 3.4	Peralihan sumbu-z hasil eksperimen.....	76
Tabel 3.5	Perbandingan peralihan sumbu-z.....	76
Tabel 3.6	Regangan sumbu-x hasil eksperimen.....	81
Tabel 3.7	Perbandingan regangan-x hasil eksperimental dengan ADINA	82
Tabel L2.1	Hasil uji pemeriksaan agregat	94
Tabel L2.2	Hasil pengujian sampel pada saat beton segar	95
Tabel L2.3	Hasil pengujian sampel pada saat beton keras	95
Tabel L2.4	Hasil uji tekan beton silinder.....	96
Tabel L2.5	Hasil uji modulus elastisitas beton-silinder 3.....	97
Tabel L2.6	Hasil uji modulus elastisitas beton-silinder 4.....	98
Tabel L2.7	Hasil uji modulus elastisitas beton-silinder 5.....	99
Tabel L2.8	Hasil uji tarik tulangan baja.....	101
Tabel L2.9	Data hasil pembacaan LVDT	104
Tabel L2.10	Data Hasil Pembacaan <i>strain gauge</i>	106

DAFTAR NOTASI

A_c	= Luas penampang beton, mm ² .
A_{cs}	= Luas potongan efektif terkecil beton pada daerah <i>strut</i> , mm ² .
A_n	= Luas penampang pada titik nodal, mm ² .
A_{st}	= Luas penampang baja tulangan, mm ² .
A_v	= Luas 2x tulangan geser, mm ² .
b	= Lebar penampang, mm.
B	= Bagian struktur yang penampangnya mempunyai distribusi regangan linier
D	= Bagian struktur yang mengalami perubahan geometri
E_c	= Modulus elastisitas beton, MPa.
E_s	= Modulus elastisitas baja, MPa.
f_c	= Kuat tekan beton pada umur 28 hari, MPa.
f_{ce}	= Kuat tekan efektif, MPa.
f_{cu}	= Kuat tekan beton pada kondisi ultimit, MPa.
F_n	= Kuat nominal <i>strut</i> , <i>tie</i> atau titik nodal, Mpa.
F_{nn}	= Kuat tekan nominal pada area titik nodal, Mpa.
F_{ns}	= Kuat tekan nominal beton pada daerah <i>strut</i> , Mpa.
F_{nt}	= Kekuaan nominal dari <i>tie</i> , Mpa.
f_s	= Tegangan baja pada kondisi beban kerja, MPa.
f'_t	= Kuat tarik beton, MPa.
f_u	= Kekuatan batas, MPa.
F_u	= Gaya pada <i>strut</i> atau <i>tie</i> atau gaya yang bekerja pada nodal akibat beban terfaktor
f_y	= Kuat leleh baja tulangan, MPa.
h	= Tinggi penampang, mm.
L	= Panjang bentang, m.
l_n	= Panjang bentang bersih, m.
P_u	= Beban, N.

P_{max} = Beban maksimum, N.

$P_{ultimate}$ = Beban ultimit, N.

P_{yield} = Beban yang menyebabkan balok berubah dari keadaan elastis menjadi plastis, N.

S = Deviasi standar.

s = Jarak antar tulangan geser, mm.

V_c = Kuat geser dari material beton, N.

V_n = Kuat geser nominal, N.

V_s = Kuat geser dari tulangan geser, N.

V_u = Gaya lintang balok, N.

w = Kerapatan beton, kg/m³.

δ = Lendutan, mm.

Φ = Faktor reduksi kekuatan.

ε_c = Regangan beton.

ε_s = Regangan baja.

ε_{cu} = Regangan beton pada kondisi ultimit.

γ_{beton} = Berat jenis beton, kg/m³

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran L1 Perhitungan Gaya Lintang Balok Tinggi	89
Lampiran L2 Penelitian Eksperimental	92