

PERANCANGAN STRUKTUR BALOK TINGGI DENGAN METODE *STRUT AND TIE*

Nama : Rani Wulansari

NRP : 0221041

Pembimbing : Winarni Hadipratomo, Ir

UNIVERSITAS KRISTEN MARANATHA
FAKULTAS TEKNIK JURUSAN TEKNIK SIPIL
BANDUNG

ABSTRAK

Perancangan struktur beton biasanya dilakukan berdasarkan asumsi dari Bernoulli dan Navier untuk analisis penampang akibat momen lentur. Distribusi regangan dianggap linier dan ini dianggap masih berlaku meskipun penampang telah retak. Balok tinggi merupakan salah satu contoh kasus pada suatu elemen struktur yang dapat mengakibatkan terjadinya distribusi regangan non-linier, sehingga asumsi di atas tidak berlaku. Balok dikatakan balok tinggi apabila rasio bentang terhadap tingginya lebih kecil dari lima.

Salah satu alternatif pendekatan untuk mengatasi elemen struktur seperti balok tinggi adalah menggunakan pendekatan *Strut and Tie Model*, yaitu dengan membagi struktur dalam daerah B (Bernoulli) dan D (*Disturb*) dan menggambarkan alur gaya (*load path*) sebagai transfer gaya yang terjadi pada struktur beton bertulang pada kondisi retak akibat pembebanannya. Parameter-parameter dari *Strut and Tie Model* yaitu batang tekan (*strut*), batang tarik (*tie*) dan titik nodal (*nodal zone*) sebagai daerah pertemuan.

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk menganalisis dan mendesain tulangan struktur balok tinggi beton bertulang di atas dua perletakan akibat beban terpusat dan merata dengan metode konvensional berdasarkan ACI yang diverifikasi dengan metode elemen hingga menggunakan SAP 2000 *Nonlinear*. Tegangan yang diperoleh dari metode elemen hingga, dipakai untuk membentuk konfigurasi *Strut and Tie*. Dari hasil perbandingan kedua metode tersebut didapat, pemodelan dengan beban terpusat menghasilkan luas tulangan geser dan longitudinal yang sama, sedangkan pemodelan dengan beban merata menggunakan metode *Strut and Tie* menghasilkan luas tulangan longitudinal yang lebih kecil dengan selisih 25 %, dimana dengan luas tulangan yang lebih kecil dari segi kekuatan masih memenuhi syarat. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan dengan metode *Strut and Tie* lebih optimum.

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|------------|
| SURAT KETERANGAN TUGAS AKHIR..... | i |
| SURAT KETERANGAN SELESAI TUGAS AKHIR..... | ii |
| ABSTRAK..... | iii |
| PRAKATA..... | iv |
| DAFTAR ISI..... | vi |
| DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN..... | ix |
| DAFTAR GAMBAR..... | xii |
| DAFTAR TABEL..... | xvi |
| | |
| BAB 1 PENDAHULUAN | |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Tujuan Penulisan..... | 4 |
| 1.3 Ruang Lingkup Pembahasan..... | 4 |
| 1.4 Sistematika Penulisan..... | 5 |
| | |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA | |
| 2.1 Balok tinggi..... | 7 |
| 2.1.1 Pengertian dan Perilaku Balok Tinggi..... | 7 |
| 2.1.2 Kriteria Desain untuk Geser pada Balok Tinggi... 12 | |
| 2.1.3 Kriteria Desain untuk Lentur pada Balok Tinggi...15 | |
| 2.1.4 Prosedur Umum Perancangan dengan Metode ACI..... | 17 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.2 | Metode Elemen Hingga dalam analisis struktur balok tinggi..... | 20 |
| 2.2.1 | Jenis-Jenis Elemen..... | 20 |
| 2.2.2 | Langkah-Langkah Metode Elemen Hingga..... | 22 |
| 2.2.3 | Elemen Segi-Empat..... | 25 |
| 2.3 | Metode <i>Strut and Tie</i> | 29 |
| 2.3.1 | Distribusi Tegangan dan Trajektori Tegangan Utama..... | 29 |
| 2.3.2 | Daerah D dan Daerah B..... | 36 |
| 2.3.3 | Batang Tekan – <i>Strut</i> | 40 |
| 2.3.4 | Batang Tarik – <i>Tie</i> | 44 |
| 2.3.5 | <i>Node</i> | 45 |
| 2.3.6 | Perancangan pada <i>Strut, Tie, dan Node</i> | 51 |
| 2.3.7 | Prosedur Umum Perancangan <i>Strut and Tie Model</i> | 55 |
| 2.3.8 | Berbagai Bentuk <i>Strut and Tie Model</i> | 58 |

BAB 3 STUDI KASUS BALOK TINGGI

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Studi Kasus dengan Metode ACI..... | 65 |
| 3.1.1 | Pemodelan dengan Beban Merata..... | 65 |
| 3.1.2 | Pemodelan dengan Beban Terpusat..... | 71 |
| 3.2 | Studi Kasus dengan bantuan <i>SAP 2000 Nonlinear</i> | 77 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 3.3 | Studi Kasus dengan <i>Strut and Tie Model</i> | 84 |
| 3.3.1 | Pemodelan dengan Beban Merata..... | 84 |
| 3.3.2 | Pemodelan dengan Beban Terpusat..... | 100 |
| BAB 4 | PEMBAHASAN | 113 |
| BAB 5 | KESIMPULAN DAN SARAN | |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 116 |
| 5.2 | Saran..... | 117 |
| | DAFTAR PUSTAKA | 119 |

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

- a = Jarak antara beban terpusat dan muka tumpuan, mm
- A_c = Luas Penampang Lintang pada salah satu ujung *Strut*, diambil tegak lurus *Strut*, mm²
- A_n = Luas muka *nodal zone*, mm²
- A_v = Luas Tulangan Geser Vertikal, mm²
- A_{vh} = Luas Tulangan Geser Horizontal, mm²
- A_s = Luas Tulangan Longitudinal pada batang tarik, mm²
- b_w = Lebar Balok, mm
- d = Jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik, mm
- f_c' = Kuat Tekan Beton, MPa
- f_{cu} = Kuat Tekan Efektif Beton, MPa
- f_y = Tegangan Leleh, MPa
- f_{yv} = Kuat Tarik Tulangan Sengkang, MPa
- F_u = Gaya pada *Strut* atau *Tie*, atau gaya yang bekerja pada salah satu titik nodal yang diakibatkan beban terfaktor, kN
- F_{nn} = Kuat Nominal dari *Nodal Zone*, kN
- F_{ns} = Kuat Nominal dari *Strut*, kN
- F_{nt} = Kuat Nominal dari *Tie*, kN
- F_u = Kekuatan terfaktor yang bekerja pada *Strut*, *Tie*, dan *nodal zone*, kN
- h = Tebal Elemen, mm
- J = Determinan Jacobian
- jd = Lengan Momen, mm

| | |
|-----------|---|
| k | = Matriks kekakuan elemen |
| L_b | = Dimensi Perletakan Tumpuan, mm |
| ℓ_n | = Bentang Bersih, mm |
| ℓ | = Panjang Efektif diukur dari tengah ke tengah Perletakan, mm |
| M_n | = Momen Nominal, kNm |
| M_u | = Momen Terfaktor, kNm |
| P_u | = Beban Terfaktor, kN |
| q | = Vektor peralihan nodal elemen |
| Q | = Gaya nodal, gaya traksi, gaya tubuh, kg |
| s | = Jarak Sengkang, mm |
| s_h | = Jarak sengkang arah Horizontal, mm |
| s_v | = Jarak sengkang arah Vertikal, mm |
| V_c | = Kuat Nominal Geser, kN |
| V_u | = Faktor Kekuatan Geser, kN |
| V_s | = Kuat Geser Nominal akibat Tulangan geser, kN |
| W_s | = Dimensi <i>Strut</i> , mm |
| W_t | = Tinggi Pelat Angkur, mm |
| w_u | = Beban Terfaktor per unit panjang dari balok, kN/m |
| W_{bs} | = Berat Sendiri Struktur, kN/m |
| W_{sd} | = Beban Mati Tambahan, kN/m |
| W_{req} | = Dimensi yang dibutuhkan, mm |
| x | = Jarak Bidang Runtuh dari Permukaan Perletakan, mm |
| β_s | = Faktor efek retak pada <i>strut</i> |

- β_n = Faktor efek penjangkaran *tie*
- γ_1 = Sudut antara sumbu *strut* dan batang
- ϵ_1 = Regangan Induk Tarik
- ϵ_s = Regangan Tarik pada Batang Tarik
- ρ_w = Rasio Tulangan Tarik
- Φ = Faktor reduksi kekuatan

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|-------------|--|
| Gambar 1.1 | Pembagian Daerah D dan B pada Balok..... 3 |
| Gambar 1.2 | Balok Tinggi di Atas Dua Perletakan..... 4 |
| Gambar 2.1 | Distribusi Tegangan dan Regangan Sepanjang Tinggi Balok... 9 |
| Gambar 2.2 | Distribusi Tegangan Elastis pada Balok Tinggi 10 |
| Gambar 2.3 | Rangka Batang Plastis..... 11 |
| Gambar 2.4 | Pemodelan Balok Tinggi..... 13 |
| Gambar 2.5 | Trajektori Tarik dan Tekan pada Balok Tinggi Menerus..... 16 |
| Gambar 2.6 | Diagram alir prosedur perancangan balok tinggi dengan Metode ACI..... 19 |
| Gambar 2.7 | Diskretisasi menjadi berbagai jumlah elemen, 24 |
| Gambar 2.8 | Kontinum dengan berbagai aspek rasio..... 25 |
| Gambar 2.9 | Elemen Segi-Empat pada Koordinat Cartesian..... 26 |
| Gambar 2.10 | Elemen Segi-4 pada koordinat alamiah..... 26 |
| Gambar 2.11 | Distribusi Tegangan sekitar Beban Kerja Terpusat..... 30 |
| Gambar 2.12 | Prinsip Saint-Venant, daerah yang dipengaruhi oleh sekelompok gaya dalam keadaan keseimbangan..... 31 |
| Gambar 2.13 | Tegangan Longitudinal pada tengah bentang dari berbagai balok dengan tinggi yang berbeda dengan beban merata..... 32 |
| Gambar 2.14 | Trajektori tegangan Utama pada <i>B-region</i> dan <i>D-Region</i> (sekitar daerah beban terpusat diskontinuitas)..... 34 |
| Gambar 2.15 | Trajektori tegangan Utama, distribusi tegangan utama dan <i>Strut and Tie Model</i> 35 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.16 | Trajektori tegangan Utama,distribusi tegangan elastis akibat beban terpusat dengan lokasi beban dan landasan yang besarnya berbeda..... | 35 |
| Gambar 2.17 | Trajektori tegangan Utama pada struktur dinding dengan beban merata yang tergantung..... | 36 |
| Gambar 2.18 | Gambar Daerah D yang disebabkan oleh diskontinuitas geometri, statika dengan atau tanpa diskontinuitas geometri | 37 |
| Gambar 2.19 | Prosedur penentuan daerah D dan B pada Balok | 38 |
| Gambar 2.20 | Prosedur pembagian daerah D dan B dari suatu balok untuk berbagai dimensi dan berbagai beban kerja..... | 39 |
| Gambar 2.21 | Distribusi Beban Normal pada struktur kolom dan dinding..... | 40 |
| Gambar 2.22 | Jenis-jenis <i>Nodal zone</i> | 46 |
| Gambar 2.23 | Idealisasi Gaya yang terjadi pada nodal..... | 47 |
| Gambar 2.24 | <i>Hydrostatic Nodal</i> | 48 |
| Gambar 2.25 | Nodal Zone yang dibatasi oleh perpotongan elemen <i>Strut</i> | 49 |
| Gambar 2.26 | <i>Plastic Truss model</i> dari suatu balok tinggi..... | 53 |
| Gambar 2.27 | Titik pertemuan <i>Strut and Tie</i> | 53 |
| Gambar 2.28 | <i>Plastic Truss model</i> dari balok dengan sengkang..... | 54 |
| Gambar 2.29 | Berbagai bentuk dasar medan tekan berupa | 55 |
| Gambar 2.30 | Diagram alir prosedur perancangan balok tinggi dengan Metode <i>Strut and Tie</i> | 57 |
| Gambar 2.31 | Gambar <i>strut and tie model</i> dari suatu balok beton diatas dua tumpuan dengan beban merata p , sebagai rangka batang dengan kelipatan satu..... | 58 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.32 | Gambar <i>strut and tie model</i> balok tinggi (<i>deep beam</i>) yang dibebani beban terpusat dan terletak diatas dua tumpuan... | 59 |
| Gambar 2.33 | Gambar <i>strut and tie model</i> dari balok tinggi (<i>deep beam</i>) yang dibebani dengan beban merata dan terletak diatas dua tumpuan..... | 60 |
| Gambar 2.34 | Gambar <i>strut and tie model</i> dari balok tinggi (<i>deep beam</i>) yang dibebani beban merata pada sisi bawahnya dan terletak diatas dua tumpuan..... | 61 |
| Gambar 2.35 | Gambar <i>strut and tie model</i> dari balok tinggi (<i>deep beam</i>) yang dibebani dengan beban terpusat dan terletak pada tumpuan menerus..... | 61 |
| Gambar 2.36 | Gambar <i>strut and tie model</i> dari balok tinggi (<i>deep beam</i>) yang dibebani dengan beban terpusat dan terletak diatas beberapa tumpuan..... | 62 |
| Gambar 2.37 | Gambar <i>strut and tie model</i> serta alternatifnya dari balok tinggi (<i>deep beam</i>) yang dibebani dengan beban terpusat dan terletak diatas dua dan tiga tumpuan menerus..... | 62 |
| Gambar 2.38 | Gambar <i>strut and tie model</i> beserta <i>Nodal Zone</i> dari balok tinggi (<i>deep beam</i>)..... | 63 |
| Gambar 2.39 | Gambar <i>strut and tie model</i> untuk struktur konsol (<i>corbel</i>) dan balok dengan tumpuan berbentuk L..... | 64 |
| Gambar 3.1 | Pemodelan Balok Tinggi dengan beban merata pada program <i>SAP 2000 Nonlinear</i> | 77 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Gambar 3.2 | Pemodelan Balok Tinggi dengan beban terpusat pada program <i>SAP 2000 Nonlinear</i> | 78 |
| Gambar 3.3 | Kontur Tegangan S11 akibat Beban Merata | 79 |
| Gambar 3.4 | Kontur Tegangan S22 akibat Beban Merata | 80 |
| Gambar 3.5 | Kontur Tegangan S11 akibat Beban Terpusat..... | 81 |
| Gambar 3.6 | Kontur Tegangan S22 akibat Beban Terpusat..... | 81 |
| Gambar 3.7 | Pembagian daerah D..... | 85 |
| Gambar 3.8 | Idealisasi beban..... | 85 |
| Gambar 3.9 | Model <i>Strut and Tie</i> | 86 |
| Gambar 3.10 | Batang rangka pemodelan <i>Strut and Tie</i> dengan gaya aksial tarik dan tekan..... | 86 |
| Gambar 3.11 | <i>Nodal Zone A</i> | 89 |
| Gambar 3.12 | <i>Nodal Zone C</i> | 91 |
| Gambar 3.13 | Detail penulangan balok tinggi dengan beban merata..... | 99 |
| Gambar 3.14 | Pembagian daerah D..... | 101 |
| Gambar 3.15 | Model <i>Strut and Tie</i> | 102 |
| Gambar 3.16 | Batang rangka pemodelan <i>Strut and Tie</i> dengan gaya aksial tarik dan tekan..... | 103 |
| Gambar 3.17 | <i>Nodal Zone J</i> | 105 |
| Gambar 3.18 | <i>Nodal Zone K</i> | 106 |
| Gambar 3.19 | Detail penulangan balok tinggi dengan beban terpusat..... | 112 |

DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|-----------|---|
| Tabel 2.1 | Elemen Satu Dimensi dan Elemen Bidang Dua Dimensi..... 20 |
| Tabel 2.2 | Elemen Pelat Dua Dimensi dan Elemen Selaput..... 21 |
| Tabel 2.3 | Elemen Limas dan Prisma Tiga Dimensi dan Elemen Simetris-Aksial..... 21 |
| Tabel 3.1 | Reaksi Perletakan Balok Tinggi dengan Beban Merata..... 82 |
| Tabel 3.2 | Reaksi Perletakan Balok Tinggi dengan Beban Terpusat..... 83 |
| Tabel 4.1 | Hasil Perhitungan dengan Metode ACI dan Metode <i>Strut and Tie</i> 113 |