

TUGAS AKHIR
DISAIN BALOK-T
DENGAN DAKTILITAS DI LUAR KETETAPAN
ACI BUILDING CODE



Disusun oleh :

SASMITO RIADI

No. Mhs. : 87310046
NIRM : 875014330044

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
1998

TUGAS AKHIR
DISAIN BALOK-T
DENGAN DAKTILITAS DI LUAR KETETAPAN
ACI BUILDING CODE

**Diajukan Untuk Melengkapi Persyaratan Dalam Rangka
Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil Pada
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta**

Disusun oleh :

SASMITO RIADI

No. Mhs. : 87310046

NIRM : 875014330044

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
1998**

LEMBAR PENGESAHAN

DISAIN BALOK-T
DENGAN DAKTILITAS DI LUAR KETETAPAN
ACI BUILDING CODE



Disusun oleh :

SASMITO RIADI

No. Mhs. : 87310046
NIRM : 875014330044

Telah Diperiksa dan Disetujui Oleh :

Ir. H. Susastrawan, MS
Dosen Pembimbing I

Tanggal : 30-07-98

Ir. A. Kadir Aboe, MS
Dosen Pembimbing II

Tanggal : 30/07/98

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
1998

MOTTO

Katakanlah: "Kalau sekiranya lautan menjadi tinta untuk (menulis) kalimat-kalimat Tuhanku, sungguh habislah lautan itu sebelum habis (ditulis) kalimat-kalimat Tuhanku, meskipun Kami tambahkan tambahan sebanyak itu (pula)".
(Al Kahfi, 109)

"Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari sesuatu urusan) kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan yang lain). Dan hanya kepada Tuhanmulah hendaknya kamu berharap"
(Alam Nasyrah, 6-8)

"Kehidupan dunia dijadikan indah dalam pandangan orang-orang kafir dan mereka memandang hina orang-orang yang beriman. Padahal orang-orang yang bertaqwa itu lebih mulia daripada mereka dihari kiamat. Dan Allah memberi rezki kepada orang-orang yang dikehendaki -Nya tanpa batas.
(Al Baqarah, 212)

Kupersembahkan buat:

Ayah ibu tercinta

(yang selalu berdo'a dan mendambakan keberhasilanku)

PRAKATA

Bismillahirrohmanirrohim

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Dengan mengucapkan puji dan syukur kehadiran Allah SWT, yang mana atas berkah dan rahmat-Nya kami dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Tugas Akhir ini dimaksudkan sebagai syarat untuk mencapai jenjang strata satu (S1), pada jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Adapun judul dari Tugas Akhir ini adalah "Disain Balok T dengan Daktilitas Di Luar Ketentuan ACI Building CODE". penulisan Tugas Akhir ini menawarkan suatu solusi disain yang mengacu pada ketentuan ACI Building CODE dan SK SNI T-15-1991-03, sehingga didapatkan suatu hasil disain yang lebih efisien.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini kami tak lepas dari bimbingan dan pengarahan dari Dosen serta dorongan moral maupun bantuan materiil dari berbagai pihak sehingga Tugas Akhir ini dapat terwujud dengan baik. Untuk itu, pada kesempatan ini kami mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Ir. Widodo, MScE,Phd. selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
2. Bapak Ir. H. Tadjudin B.M. Aris, MS selaku ketua jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia
3. Bapak Ir. H. Sunastroyan, MS, selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir.
4. Bapak Ir. A. Kadir Abou, MS, selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir
5. Yang terhormat Ibu dan Bapak, yang tersayang adik-adikku setiap saat selalu mendukung dan memberi dorongan serta menantikan keberhasilanku.
6. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Semoga Allah dan ketekunannya yang telah diberikan mendapat balasan yang sempurna dari Allah SWT. Amin

Penyusun telah berusaha dengan segala kemampuan untuk membuat dan mewujudkan Tugas Akhir ini sebaik-baiknya. Namun

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR MOTTO DAN PERSEMBAHAN	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	vii
ABSTRAKSI	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Permasalahan.....	4
1.3. Tujuan	5
1.4. Batasan Masalah	6
1.5. Cara Studi.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Konsep Dasar Balok Bertampang T.....	8
2.2. Analisa Metode Perencanaan Kekuatan.....	12
BAB III LANDASAN TEORI	
3.1. Analisa Kuat Lentur Metode Perencanaan Kekuatan	18
3.1.1. Prinsip Dasar Kuat Lentur Nominal	18
3.1.2. Distribusi Tegangan Persegi Ekuivalen.....	23
3.2. Balok Bertulang Seimbang	27

3.3. Batasan Daktililitas Suatu Tampang Balok	30
3.4. Analisa Lentur Tampang T	34
3.4.1. Balok Tampang T Persegi	37
3.4.2. Balok Tampang T Murni	40
3.4.3. Ratio Regangan Baja Tulangan $\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$	43
BAB IV DISAIN BALOK T	
4.1. Data dan Asumsi Disain	50
4.2. Disain	54
4.2.1. Beban-beban Yang Bekerja pada Balok.....	54
4.2.2. Perhitungan Momen	58
4.2.3. Perencanaan Balok T mengacu pada ACI Building CODE	60
4.2.4. Disain Balok T mengacu pada "Disain Usulan"	69
BAB V PEMBAHASAN	
Pembahasan	79
BAB VI SIMPULAN dan SARAN	
6.1. Simpulan	84
6.2. Saran	84
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

ABSTRAKSI

Perencanaan tampang suatu elemen struktur merupakan salah satu usaha untuk mendapatkan dimensi tampang seefisien mungkin. Dari hasil perencanaan tersebut akan diketahui kekuatan suatu elemen struktur untuk mendukung beban-beban yang ada.

Salah satu persyaratan yang ditetapkan oleh SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE dalam mendisain atau merencanakan suatu tampang elemen lentur beton bertulang yang harus dipenuhi adalah kekuatan lentur dan mengacu pada "Daktilitas minimum".

Daktilitas ini digambarkan sebagai kelengkungan ultimit pada tampang serta berhubungan dengan regangan tarik ultimit baja tulangan ϵ_{su} .

Dalam kasus balok tampang T pada struktur balok sederhana yang menerima beban dan momen relatif besar sering mengalami lendutan yang besar. Pada prinsipnya daktilitas suatu elemen lentur beton bertulang tampang T dicapai bilaman penampang tersebut mengandung sejumlah baja tulangan tarik (A_s) kurang dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan (A_{sb}) SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE mendefinisikan daktilitas tersebut dengan batasan sebagai berikut:

$$A_s \leq A_{s,max}$$

$$\text{dengan } A_{s,max} = 0,75 A_{sb}$$

Pada kenyataannya, perencanaan balok tampang T tersebut mempunyai kesulitan dalam memenuhi ketentuan mengenai persyaratan daktilitas minimum

yang ditetapkan dalam ACI Building CODE dan SK SNI T-15-1991-03. Disain usulan menawarkan suatu solusi yang dapat mengurangi besarnya lendutan pada balok yang didisain mengacu pada kedua standar atau ketentuan tersebut di atas.

Prinsip dari disain usulan adalah mereduksi harga regangan baja tarik balok tampang T ($\epsilon_{su,T}$) yang terjadi dengan nilai regangan baja tulangan tarik tampang empat persegi panjang ($\epsilon_{su,R}$). Dengan reduksi nilai regangan baja tulangan tarik tersebut diharapkan lendutan pada balok tampang T dapat dikurangi.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Struktur bangunan gedung beton bertulang pada dasarnya tersusun atas elemen-elemen lentur yang berupa plat, batok dan kolom.

Plat, elemen lentur yang mendukung seluruh beban untuk diteruskan ke pondasi bangunan melalui kolom, pada kenyataannya mempunyai bentangan yang sangat terbatas. Hal ini berkaitan dengan adanya persyaratan yang harus dipenuhi mengenai panjang bentang teoritis untuk mendapatkan ketebalan struktur plat yang hemat dan praktis. Untuk mendapatkan hal tersebut, yakni bentangan panjang dengan ketebalan yang hemat dan beban mati sekecil mungkin, maka dibangun elemen-elemen struktur beton bertulang berupa balok maupun balok silang (sistem balok anak dan induk) yang menopang plat. Hubungan antara plat dan balok merupakan suatu kesatuan monolit.

Analisa dan perencanaan sistem struktur seperti di atas, yakni plat dan balok yang dicetak menjadi satu kesatuan monolit

didasarkan anggapan adanya interaksi antara plat dan balok saat menahan Momen Lentur Positif yang bekerja pada balok. Interaksi antara plat dan balok yang menjadi satu kesatuan pada penampangnya membentuk huruf T tipikal, dan oleh karena itulah balok-balok tersebut dinamakan sebagai Balok-T.

Salah satu persyaratan yang ditetapkan oleh SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE dalam mendisain suatu tampang elemen lentur beton bertulang yang harus dipenuhi adalah kekuatan lentur dan mengacu kepada "Daktilitas Minimum". Daktilitas ini digambarkan sebagai kelengkungan ultimit (The Ultimate Curvature, Φ_u) pada tampang, dan juga berhubungan dengan regangan tarik ultimit baja ϵ_{su} . Apabila nilai ϵ_{su} melebihi regangan luluh baja ϵ_y dengan batas-batas tertentu, maka penampang tersebut dapat diterima sebagai elemen struktur yang aman. Bila batas ini naik, maka begitu pula daktilitas penampang tersebut akan naik pula.

Dalam kasus balok tampang-T pada struktur balok sederhana ("Simple beam") yang menerima beban dan momen relatif besar sering mengalami lendutan yang besar, walaupun masih dalam batas-batas keamanan akan tetapi dapat mengganggu segi estetika.

Pada prinsipnya daktilitas suatu elemen lentur beton bertulang tampang-T dalam Metode Perencanaan Kekuatan (Strength Design Method, SD Method) dicapai bilamana penampang tersebut mengandung sejumlah tulangan baja tarik (A_s) kurang dari yang diperlukan untuk

mencapai keseimbangan regangan (A_{sb}). Penambahan tulangan baja yang melebihi A_{sb} tidak akan memperlihatkan daktilitas bila dibebani sampai gagal. Ini disebabkan tegangan ultimit dalam baja di bawah kuat luluh.

Untuk memenuhi hal tersebut maka ditetapkan koefisien pembatas untuk tulangan baja tarik yang sekaligus sebagai batasan daktilitas minimum, yakni

$$A_s \leq A_{s,max}, \text{ dengan } A_{s,max} = \alpha \cdot A_{sb}$$

$$\alpha = 0,75$$

Penampang dengan batasan tulangan seperti tersebut di atas akan memperlihatkan lenturan yang besar setelah baja mencapai titik leleh, sehingga memberikan peringatan yang tepat sebelum gagalnya balok dalam waktu dekat. Kondisi seperti inilah yang diharapkan oleh perancang, karena kegagalan balok akan didahului oleh peringatan sehingga memperkecil resiko yang akan terjadi. Namun demikian, suatu hal yang tidak disadari oleh kebanyakan para perancang adalah

bahwa ACI Building CODE pasal 10.3.3 menekankan batasan daktilitas minimum pada balok tampang-T dari pada balok tampang empat persegi panjang. Hal ini terlihat pada suatu perhitungan batas regangan minimum baja tarik $\epsilon_{su, min}$.

Batas regangan minimum baja tarik untuk tampang-T $\epsilon_{su,T}$ akan selalu

lebih besar dibandingkan dengan batas regangan minimum baja tarik

untuk tampang empat persegi panjang $\epsilon_{su,R}$. Besarnya $\epsilon_{su,R}$ ini tetap konstan untuk suatu harga kuat luluh suatu penulangan, sedangkan besarnya $\epsilon_{su,T}$ bervariasi. Faktor yang mempengaruhi besarnya harga $\epsilon_{su,T}$ ini adalah geometri tampang itu sendiri, yakni perbandingan antara lebar flens dan lebar badan balok (b_f/b_w) maupun perbandingan antara tebal flens dan tinggi efektif balok (t/d).

1.2. Permasalahan

Pada kenyataannya, analisa dan perencanaan elemen lentur beton bertulang balok bertampang T mempunyai kelemahan dalam memenuhi ketentuan-ketentuan mengenai persyaratan Daktilitas minimum yang ditetapkan oleh ACI Building CODE maupun SK SNI T-15-1991-03.

Hal ini diakibatkan banyaknya faktor yang mempengaruhi besarnya harga $\epsilon_{su,T}$ pada setiap penulangan. Seperti yang telah disebutkan pada sub bab pendahuluan bahwa faktor yang mempengaruhi adalah geometri tampang itu sendiri, selain perbandingan antara lebar flens dan lebar badan balok (b_f / b_w) maupun perbandingan antara tebal flens dan tinggi efektif (t/d) juga dipengaruhi oleh parameter ϵ_{cu} , ϵ_y serta α .

Kondisi balok pada saat mengalami Momen lentur yang relatif besar, tampang yang dirancang memenuhi persyaratan ACI Building

CODE pasal 10.3.3 maupun SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.3, pada batas tertentu luas penulangan tarik yang dibutuhkan (A_s) melebihi luas penulangan maksimal yang ditetapkan oleh peraturan ($A_{s,max} = 0,75 A_{sb}$).

Kondisi atau keadaan semacam itu terutama dialami pada balok balok T yang ditopang secara sederhana ("*Simpie Beam*"), yakni yang digunakan pada struktur pracetak, bangunan gudang, struktur parkir ataupun pada konstruksi jembatan.

Pada struktur seperti di atas ada kemungkinan Momen Lentur M akan cukup besar melampaui $0,8 \cdot M_{n,max}$. maka ini perlu menetapkan tulangan tekan untuk mengimbangi kelebihan momen lentur yang ada, yakni $M_{max} - 0,8 \cdot M_{n,max}$. Disamping itu juga menetapkan suatu tulangan tarik tambahan pada daerah tarik.

Memenuhi daktilitas minimum yang ditetapkan oleh peraturan, untuk tampang- T pada konstruksi seperti di atas akan menghasilkan sejumlah luas tulangan baja lebih besar daripada yang dibutuhkan apabila perancang diperkenankan mengacu pada daktilitas minimum yang diminta pada penampang empat persegi panjang.

1.3. Tujuan

Tujuan dari kajian ini, ialah bagaimana mendisain elemen lentur beton bertulang balok bertampang-T yang dikenakan Momen Lentur relatif besar agar mendapatkan tampang yang praktis. Karena daktilitas tampang-T yang mengacu pada ketentuan ACI Building CODE dan SK SNI

T-15-1991-Q3 sangat besar sekali (melendut sekali, tidak memenuhi kelayakan), maka tampang-T didisain agar memenuhi sifat kelayakan. Walaupun tidak mengacu pada ketetapan ACI & SK SNI akan tetapi masih dalam batas-batas keamanan yakni dengan memakai harga $\epsilon_{su,R}$ ke dalam disain tampang-T.

1.4. Batasan Masalah

Karena banyaknya masalah yang berkaitan dengan struktur beton bertulang, khususnya elemen lentur balok T, maka penulisan Tugas Akhir ini dibuat batasan masalah agar kajian ini terfokus pada substansinya dan jelas. Di dalam penulisan tugas akhir ini, sebagai contoh perhitungan adalah gelagar memanjang pada suatu struktur jembatan.

Batasan masalah penulisan Tugas Akhir yang berbentuk studi literatur ini meliputi hal-hal sebagai berikut:

1. Struktur diletakkan di atas dua tumpuan (struktur balok sederhana) dengan bentang 10 m
2. Struktur hanya menerima beban merata dan ditinjau hanya menahan beban statis
3. Tegangan karakteristik beton yang digunakan sebesar 28 MPa
4. Kuat tarik baja atau tegangan luluh baja (f_y) sebesar 414 MPa
5. "Regangan terkecil yang diperkenankan pada baja tarik" tampang T (ϵ_{su}) digunakan $\epsilon_{su,R}$.
6. Perhitungan desain balok hanya meninjau akibat beban lentur

7. Perhitungan desain balok sebagai solusi agar desain mencapai sifat serviceability yang memuaskan, yakni agar balok tidak terlalu melendut walaupun masih dalam batas keamanan.

1.5. Cara Studi

Penulisan tugas akhir yang berbentuk studi literatur ini bersifat menyajikan solusi pada pendisainan balok-T agar salah satu sifat kelayakan tercapai dengan memuaskan. Salah satu sifat kelayakan itu, yakni mengendalikan lendutan yang berlebihan agar struktur memenuhi estetika yang diharapkan.

Dalam studi ini lebih menekankan kepada pengendalian daktilitas balok tampang-T menggunakan formula regangan batas yang diperkenankan pada balok tampang empat persegi panjang sehingga terpenuhi salah satu persyaratan sifat kelayakan, yakni lendutan yang tidak berlebihan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Konsep Dasar Balok Bertampang T

Balok bertampang-T adalah balok yang pada dasarnya dibuat bertampang tipikal T. Selain itu balok yang dicor monolit dengan plat lazim juga disebut balok bertampang T, karena lendutan pada balok mengakibatkan bagian lantai yang bersebelahan ikut melendut. Tegangan tekan timbul baik pada badan balok maupun pada lantai. Kondisi seperti ini, perlu kita ketahui berapa bagian lebar lantai yang menerima gaya-gaya dari balok (Gideon, 1993, seri 1, hal 111).

Kesatuan monolit antara lebar lantai yang ikut menerima distribusi gaya-gaya dari balok atau lebar efektif flens dengan balok tersebut yang lazim disebut balok bertampang T.

Balok tampang T ini adalah salah satu penampang balok bukan segi empat yang paling sering digunakan. Ini disebabkan karena flens yang dicor monolit dengan balok memberi kontribusi kekuatan dan kekakuan pada balok (Edward G. Nawy, 1990, hal. 119).

Penampang balok T atau balok berflens ini terutama digunakan pada daerah lapangan, karena pada daerah ini flens mengalami tekan,

sehingga flens memberi kontribusi kekuatan momen pada daerah lapangan. Sedang pada daerah tumpuan, flens mengalami tarik, sehingga bagian ini diabaikan dalam perhitungan kekuatan momen penampang tumpuan.

Prinsip-prinsip dasar dalam pendisainan balok berflens atau balok tampang-T juga menggunakan prinsip dasar disain balok segi empat. Perbedaan utama antara penampang segi empat dengan penampang balok T adalah dalam perhitungan gaya tekan C. Perhitungan gaya tekan C pada balok tampang-T ini bergantung pada letak garis netral. Apabila letak garis netral berada pada daerah flens, maka dalam analisa maupun pendisainan, balok diasumsikan sebagai penampang segi empat biasa. Ini disebabkan karena blok tegangan segi empat ekuivalen lebih kecil dari tebal flens. Sehingga dalam analisa, sebagai lebar balok harus dipakai lebar flens pada sisi tertekan. Sedang dalam kasus yang lain, yakni letak garis netral berada pada daerah balok atau di bawah flens. Pada kasus ini tinggi blok tegangan ekuivalen dapat lebih kecil atau lebih besar dari pada tebal flens. Apabila tinggi blok tegangan ekuivalen berada dalam flens, maka disain balok tersebut masih dapat ditinjau sebagai balok segi empat biasa. Akan tetapi bila blok tegangan ekuivalen lebih besar dari flens, maka disain penampang dihitung berdasarkan analisa dan disain balok T (Edward G. Nawy, 1990, hal 22). Kontribusi adanya flens di kiri maupun kanan sisi balok yang mengalami tekanan, dipandang sebagai

analog dengan adanya tulangan tekan imajiner.

Sedangkan kekuatan lentur balok tampang-T dianggap sama dengan kekuatan lentur balok tampang segi empat, selama mempunyai luas permukaan tekan yang sama di atas garis netral, luas tulangan dan tinggi efektif penampang yang sama (Chu-Kia Wang, 1993, jilid 1 , hai. 292).

Standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.1.10 dan ACI-8-10.2-4 (Chu-Kia Wang, 1993, jilid 1 , ha1.295) memberikan pembatasan lebar flens efektif balok-T sebagai berikut:

1 . Lebar flens efektif yang diperhitungkan tidak lebih dari seperempat panjang bentang balok, sedangkan lebar efektif bagian plat yang menonjol di kedua sisi dari balok tidak lebih dari delapan kali tebal plat, dan juga tidak lebih besar dari separuh jarak bersih dengan balok di sebelahnya. Atau dengan kata lain lebar flens efektif yang diperhitungkan tidak lebih besar dan diambil nilai terkecil dari nilai-nilai berikut:

- a. $b_f \leq$ seperempat panjang bentang
- b. $b_f \leq b_w + 16 t_f$
- c. $b_f \leq$ jarak dari pusat ke pusat

2. Untuk balok yang hanya mempunyai flens pada satu sisi, lebar efektif bagian plat yang menonjol yang diperhitungkan tidak lebih besar dari seperduabetas panjang bentangan balok, atau enam kali

tebal plat, atau setengah jarak bersih dengan balok disebelahnya.

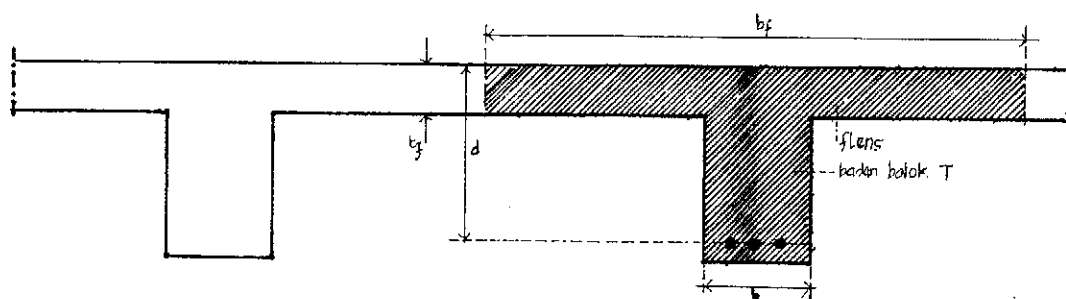
Atau dengan kata lain lebar flens efektif diambil nilai terkecil dari

- a. $b_f \leq b_w + L/12$
- b. $b_f \leq b_w + 6 t_f$
- c. $b_f \leq b_w + 1/2$ (jarak bersih ke balok sebelahny)

3. Untuk balok yang khusus dibentuk sebagai balok-T dengan maksud untuk mendapatkan tambahan luas daerah tekan, ketebalan flens tidak boleh kurang dari separoh lebar balok, dan lebar flens total tidak boleh lebih besar dari empat kali lebar balok. Atau dengan kata lain

- a. $t_f \geq 1/2 \cdot b_w$
- b. $b_f \leq 4 \cdot b_w$

Oleh karena lebar efektif yang sebenarnya sangat tergantung pada perbandingan antara t_f/d dan L/b_w maka persyaratan bersifat suatu pendekatan. Persyaratan-persyaratan di atas diilustrasikan dalam gambar 2.1 .



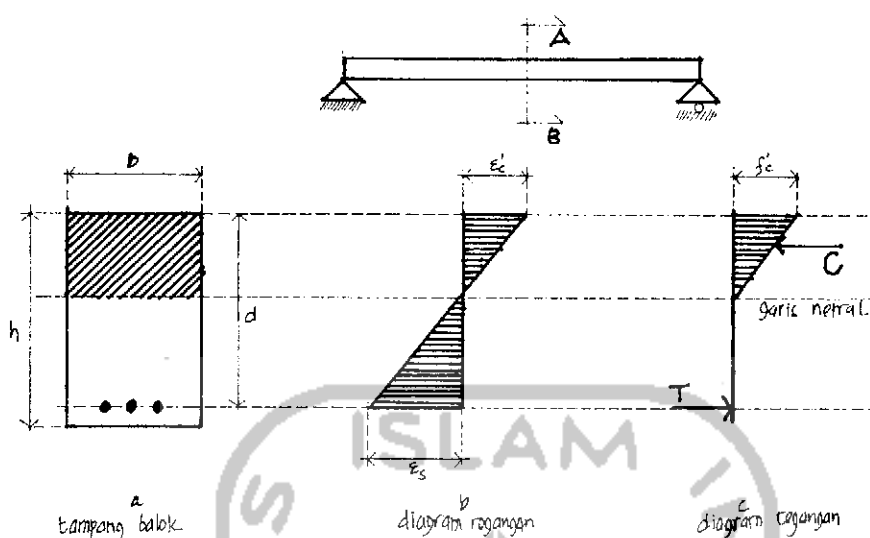
(Gambar 2.1 Penampang efektif balok T dalam suatu sistem lantai)

2.2. Analisa Metode Perencanaan Kekuatan

Analisa dan perencanaan cara Metode Perencanaan Kekuatan ("Strength Design Method" SD Method) adalah suatu metode yang sejak jangka waktu 30 tahun belakangan ini dipakai sebagai pendekatan yang dianggap lebih realistis dibanding dengan metode elastik cara-n atau metode tegangan kerja ("Working Stress Design Method" WSD Method).

Metode perencanaan kekuatan ini mulai dipergunakan dalam ACI Building CODE sejak tahun 1956, yakni sebagai metode alternatif. Pada tahun 1971, ACI Building CODE memperlakukan metode ini sebagai satu-satunya teknik analisa dan perencanaan untuk berbagai pemakaian praktis. Di Indonesia sendiri, metode perencanaan kekuatan ini baru diperkenalkan dalam PBI pada tahun 1971 sebagai metode alternatif.

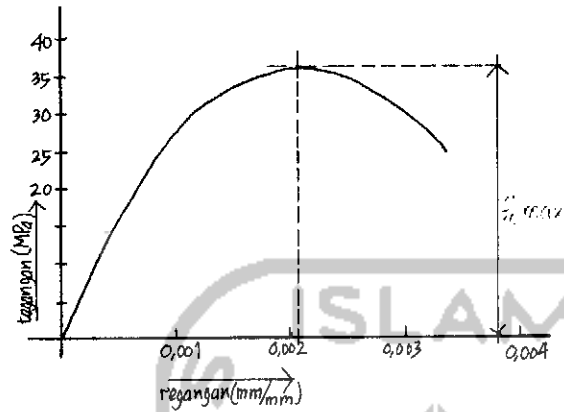
Pendekatan metode perencanaan kekuatan ini didasarkan atas hubungan sebanding antara tegangan dan regangan dalam beton terdesak hanya berlaku sampai pada suatu batas keadaan pembebanan tertentu, yakni pada tingkat beban sedang, seperti terlihat pada gambar 2.2. (Istimawan, 1994, ha1.25)



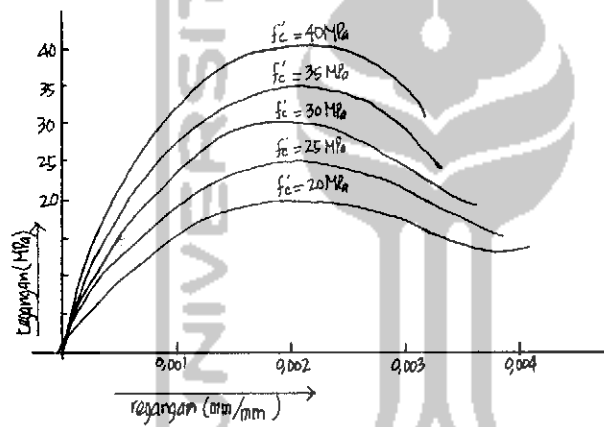
Gambar 2.2. Perilaku lentur pada beban sedang

Pada kondisi ini, nilai kuat tarik beton telah terlampaui dan beton mengalami retak rambut. Karena beton tidak dapat meneruskan gaya tarik melewati daerah retak, sehingga seluruh gaya tarik yang timbul dipikul sepenuhnya oleh baja tulangan. Hal ini diperkirakan akan terjadi pada penampang balok hingga tegangan beton mencapai $0,5 f_c'$.

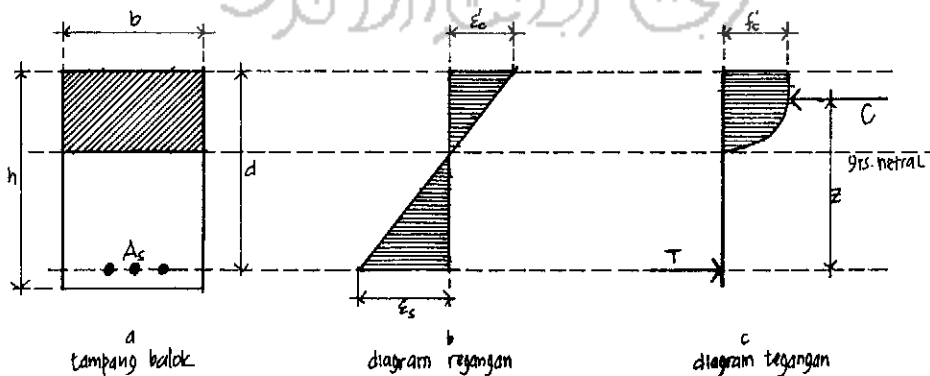
Pada kondisi tersebut, distribusi tegangan beton tekan masih dianggap bernilai sebanding dengan nilai regangannya. Akan tetapi bila pada tingkat pembebanan ini beban ditambah terus keadaan sebanding akan hilang dan diagram tegangan pada penampang balok beton akan berbentuk setara dengan kurva tegangan beton tekan seperti terlihat pada gambar 2.3 dan 2.4, sedangkan distribusi tegangan dan regangan pada penampang terlihat seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.3. Tegangan tekan benda uji



Gambar 2.4. Berbagai kuat tekan benda uji beton



Gambar 2.5. Distribusi regangan dan tegangan dekat beban ultimit

Kondisi yang terlihat seperti pada gambar 2.5, apabila kapasitas batas kuat beton terlampaui dan baja tulangan mencapai luluh, balok mengalami hancur. Pada tahap kapasitas ultimit atau terlampauinya kapasitas batas kuat beton ini merupakan proses yang tidak dapat terulang.

Apabila elemen struktur yang lain mengalami hal yang sama, yakni melampaui kapasitas batas kuat beton, meskipun belum hancur secara keseluruhan akan tetapi sistem struktur secara keseluruhan dalam strata runtuh.

Namun demikian dengan menggunakan beberapa faktor reduksi atau faktor keamanan, tercapainya keadaan ultimit dapat diperhitungkan. Faktor reduksi dan faktor keamanan pada metode perencanaan kekuatan ini sudah mulai digunakan sejak sistem pembebanan, yakni beban kerja ("*service loads*") yang diperbesar dengan suatu faktor beban, yang selanjutnya disebut dengan beban berfaktor ("*factored load*"). Hal ini dimaksudkan untuk memperhitungkan terjadinya beban pada saat keruntuhan telah diambang pintu.

Kemudian, dengan menggunakan beban berfaktor tersebut, struktur dirancang sedemikian rupa sehingga didapatkan nilai kuat guna pada saat runtuh yang besarnya lebih kecil dari kuat batas runtuh sesungguhnya (kuat ultimit, "*ultimate strength*"). Sedangkan beban

yang bekerja pada atau dekat dengan saat runtuh dinamakan Beban Ultimit.

Dari analisa keseimbangan statis dan kesesuaian regangan-tegangan yang tidak linear pada suatu penampang elemen struktur didapat suatu kuat teoritis atau Kuat Nominal ("*Nominal Strength*"). Suatu faktor reduksi ϕ yang dikalikan dengan nilai kuat nominal tersebut akan menghasilkan nilai Kuat Rencana ("*Design Strength*").

Pada prinsipnya pendekatan dan pengembangan Metode Perencanaan Kekuatan ini didasarkan atas anggapan-anggapan sebagai berikut, (Istimawan, 1994, hal.28) :

1. Bidang penampang rata sebelum terjadi lenturan, tetap rata setelah terjadi lenturan dan tetap berkedudukan tegak lurus pada sumbu bujur balok (prinsip Bernoulli). Oleh karena itu, nilai regangan dalam penampang komponen struktur terdistribusi linear atau sebanding lurus terhadap jarak ke garis netral (prinsip Navier).
2. Tegangan sebanding dengan regangan hanya sampai pada kira-kira beban sedang, saat tegangan beton tekan belum melampaui $\pm 0,5 f_c$. Apabila beban meningkat sampai beban ultimit, tegangan tekan tidak lagi linear. Bentuk blok tegangan beton tekan pada penampangnya berupa garis lengkung dimulai dari garis netral dan berakhir pada serat tepi tekan terluar. Tegangan tekan maksimum

sebagai kuat tekan lentur beton pada umumnya tidak terjadi pada serat tepi tekan terluar, tetapi agak masuk ke dalam.

3. Dalam memperhitungkan kapasitas Momen Ultimit Komponen Struktur, kuat tarik beton diabaikan (tidak diperhitungkan) dan seluruh gaya tarik dilimpahkan kepada tulangan baja tarik.

Letak resultante gaya tarik yang bekerja pada tulangan baja dihitung berdasarkan anggapan bahwa baja tulangan meregang secara serempak dengan nilai regangan diukur pada pusat beratnya. Nilai tegangan baja tulangan adalah $E_s \cdot \epsilon_s$, ini apabila regangan baja tulangan ϵ_s belum mencapai luluh ϵ_y . Hal demikian menganggap bahwa untuk tegangan baja tulangan yang belum mencapai f_y , maka tegangan sebanding dengan regangannya. Sedang untuk $\epsilon_s \geq \epsilon_y$, maka tegangan baja tidak lagi sebanding dengan regangan dan digunakan nilai f_y .

Senada dengan anggapan nomor 3, maka besarnya selimut beton dan bentuk penampang daerah tarik tidak mempengaruhi kekuatan lentur. Tinggi penampang yang menentukan adalah tinggi efektif d , yakni dari serat tepi tekan terluar terhadap titik berat baja tulangan.

BAB III

LANDASAN TEORI

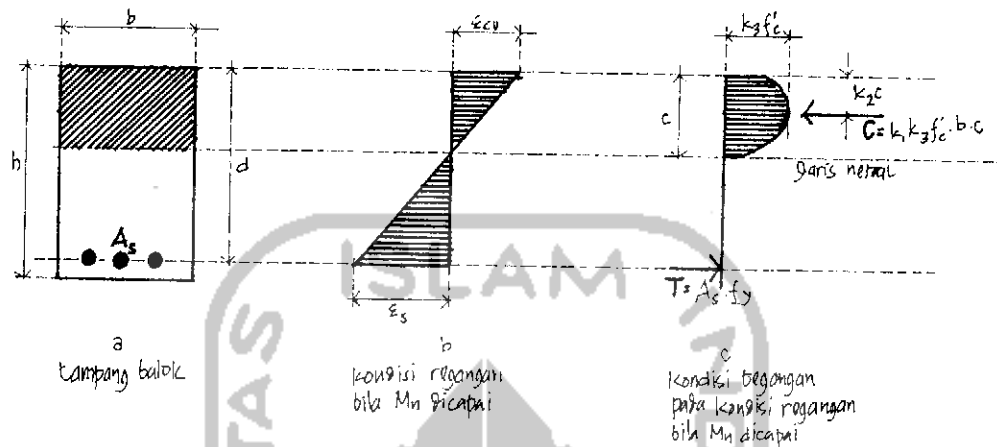
3.1. Analisa Kuat Lentur Metode Perencanaan Kekuatan

Analisa suatu penampang balok beton bertulang terhadap lentur dimaksudkan untuk menentukan apakah penampang memiliki kekuatan yang cukup atau tidak di dalam memikul beban kerja atau momen kerja. Sistem juga harus memiliki sifat kelayakan ("*serviceability*") yakni harus memiliki penampilan yang memuaskan terhadap beban kerja tanpa memperlihatkan efek-efek yang merugikan, seperti lendutan yang berlebihan, relak ataupun getaran, (Chu-Kia Wang, 1993).

3.1.1. Prinsip Dasar Kuat Lentur Nominal

Telah dikemukakan bahwa distribusi tegangan beton tekan pada penampang yang menderita tegangan di atas $0,5 f_c$ bentuknya setara dengan kurva tegangan-regangan beton. Bentuk distribusi tegangan tekan untuk balok yang telah mencapai kekuatan nominal berupa garis lengkung dengan nilai nol yang dimulai dari garis netral dan berakhir pada serat tepi tekan terluar penampang, seperti terlihat pada gambar 3.1. Tegangan tekan maksimal tercapai bukan pada serat tepi tekan terluar tampang, akan tetapi agak masuk ke dalam daerah tekan

beton. Tegangan tekan maksimum tersebut dapat ditulis sebagai $K_3 f'_c$.



Gambar 3.1. Kondisi saat kekuatan lentur nominal M_n tercapai

Kekuatan lentur nominal ("*Nominal Strength*") pada penampang dimisalkan tercapai bila regangan di dalam serat tepi tekan terluar sama dengan regangan runtuh beton $\epsilon_{cu} = 0,003$. Pada saat beton runtuh, dua kemungkinan yang akan terjadi pada regangan baja tulangan ϵ_s adalah regangan baja akan lebih besar atau lebih kecil dari regangan $\epsilon_y = f_y/E_s$ pada saat luluh pertama. Hal ini dipengaruhi oleh perbandingan dari tulangan terhadap beton. Apabila luas tulangan relatif sedikit, maka tulangan akan meleleh sebelum beton hancur, kondisi ini akan menghasilkan ragam kehancuran yang daktail dengan deformasi besar. Pada kasus lain, luas tulangan relatif besar yang membuat kondisi tulangan tetap berada dalam keadaan elastis saat kehancuran beton. Ini menyebabkan kehancuran getas tanpa tanda

tanda awal. Distribusi tegangan tekan yang terlihat pada gambar 3.1. dengan tegangan tekan maksimum $k_3 f'_c$ memberikan tegangan rata-rata pada suatu penampang balok dengan lebar tetap adalah $k_1 k_3 f'_c$. Letak titik berat penyebaran tegangan adalah $k_2 c$ diukur dari serat tepi tekan terluar, sedangkan c adalah jarak garis netral dari serat tepi tekan terluar.

Berdasarkan asumsi-asumsi yang telah dikemukakan di atas, maka dapat dilakukan perhitungan regangan, tegangan maupun gaya-gaya yang timbul pada penampang balok yang menahan Momen Batas, yakni momen akibat beban luar yang timbul tepat pada saat terjadi hancur. Momen ini menggambarkan kekuatan dan lazim disebut sebagai Kuat Lentur Ultimit Balok.

Kuat lentur suatu balok beton tersedia karena berlangsungnya mekanisme tegangan-tegangan dalam yang timbul di dalam penampang balok, yang pada kondisi tertentu dapat diwakili oleh gaya-dalam. Seperti tampak pada gambar 3.1, C adalah resultante gaya tekan-dalam yang merupakan resultan atau penjumlahan tegangan-tegangan tekan yang bekerja pada daerah tekan beton, dan dapat dianggap sebagai isi dari "*Stress Solid*" atau benda tegangan sebesar,

$$C = (k_1 k_3 f'_c) (c) (b) \dots\dots\dots 3.1$$

Sedangkan T adalah resultante gaya tarik-dalam, yang merupakan jumlah seluruh gaya tarik yang diperhitungkan untuk daerah di bawah garis netral atau daerah tarik penampang balok. Pada kondisi kehancuran yang duktail, gaya tarik T adalah :

$$T = A_s \cdot f_y \dots\dots\dots 3.2$$

Memenuhi keseimbangan $\Sigma (H) = 0$, maka C harus sama dengan dengan T . Sedangkan arah garis kerjanya sejajar, tetapi berlawanan arah yang dipisahkan dengan jarak $Z = d - k_2c$, sehingga membentuk kopel momen tahanan-dalam. Nilai maksimum kopel momen tahanan dalam tersebut disebut Kuat lentur atau Momen Tahanan Penampang komponen struktur terlentur.

Momen tahanan-dalam tersebut yang akan memikul momen lentur rencana aktual yang ditimbulkan oleh beban luar. Untuk itu dalam mendisain balok pada kondisi pembeban tertentu harus disusun komposisi dimensi penampang balok beton dan luas tulangan baja sedemikian rupa sehingga menghasilkan momen tahanan-dalam minimal sama dengan momen lentur maksimum yang ditimbulkan oleh beban luar. Hal yang penting dalam menentukan momen tahanan-dalam adalah mengetahui terlebih dahulu resultante gaya tekan beton C dan letak garis kerja gaya yang diukur dari serat tepi tekan terluar, sehingga Z dapat diketahui. Dari keseimbangan gaya $C = T$ menghasilkan letak garis netral yang seterusnya dapat dihitung letak

garis kerja sebagai berikut :

$$C = T$$

$$(k_1 k_3 f_c) (c) (b) = A_s \cdot f_y$$

$$c = \frac{A_s \cdot f_y}{k_1 k_3 f_c \cdot b} \dots \dots \dots 3.3$$

Sehingga letak garis kerja $k_2 c$ tersebut adalah:

$$\frac{k_2}{k_1 k_2} \frac{A_s \cdot f_y}{f_c \cdot b} \dots \dots \dots 3.3.a$$

Kekuatan lentur nominal selanjutnya dapat dihitung sebagai berikut :

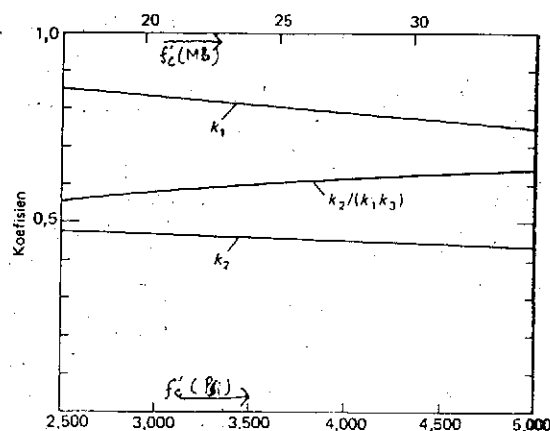
$$M_n = T \cdot (d - k_2 c)$$

$$= A_s \cdot f_y (d - k_2 c) \dots \dots \dots 3.4.$$

Dengan mensubstitusikan c dari persamaan (3.3) ke dalam persamaan (3.4) menghasilkan kuat lentur nominal sebagai berikut :

$$M_n = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{k_2}{k_1 k_3} \frac{A_s \cdot f_y}{f_c \cdot b} \right) \dots \dots \dots 3.4.a$$

Untuk menghitung letak garis kerja maupun kuat lentur nominal tersebut tidak perlu mencari harga dari masing-masing k_1 , k_2 , dan k_3 , karena besaran gabungan $k_2/k_1 k_3$ dapat langsung dicari dari grafik seperti yang terlihat dalam gambar 3.2



Gambar 3.2 Parameter "Padat tegangan" (diambil dari ACI Buliding CODE).

Dari grafik tersebut, nilai besaran gabungan k_2/k_1k_3 berkisar antara 0,55 sampai dengan 0,63.

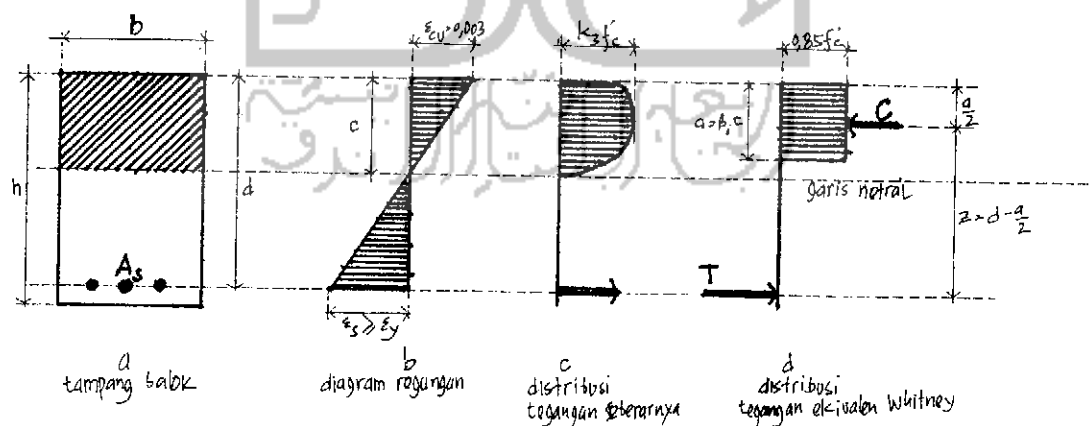
3.1.2 Distribusi Tegangan Persegi Ekvivalen

Perhitungan kekuatan lentur nominal M_n yang didasarkan atas distribusi tegangan bentuk parabola seperti pada gambar 3.1. dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (3.4a) untuk harga k_1/k_2k_3 yang telah ditetapkan. Akan tetapi perhitungan yang didasarkan atas bentuk parabola tersebut tidaklah mudah. Oleh karena itu, untuk memudahkan perhitungan ditentukan melalui penyederhanaan bentuk distribusi tegangan lengkung diganti dengan bentuk ekuivalen yang lebih sederhana, dengan menggunakan nilai intensitas tegangan rata-rata sedemikian sehingga nilai dan letak resultante tidak berubah.

Untuk perhitungan selanjutnya, pada metode perencanaan kekuatan ini digunakan distribusi tegangan ekuivalen bentuk persegi

yang diusulkan oleh Whitney sebagai penyederhanaan dari bentuk distribusi tegangan lengkung.

Seperti terlihat pada gambar 3.3, Whitney menyarankan suatu distribusi tegangan persegi dengan nilai intensitas tegangan rata-rata $0,85f'_c$ dan tinggi blok tegangan $a = \beta_1 \cdot c$. Whitney menetapkan harga β_1 sebesar 0,85 untuk $f'_c < 30 \text{ MPa}$, dan berkurang sebesar 0,08 untuk setiap kelebihan 10 MPa , akan tetapi tidak boleh kurang dari 0,65. Dengan menggunakan tegangan persegi ekuivalen ini, seperti terlihat pada gambar 3.3. Kuat lentur nominal M_n dapat dihitung. Kuat lentur nominal ini adalah nilai maksimum yang diperoleh dari gaya-gaya dalam C (resultante gaya tekan-dalam) dan T (resultante gaya tarik-dalam) yang membentuk suatu Kopel Momen Tahanan-dalam dengan jarak $Z = d - a/2$, dengan d adalah tinggi efektif balok.



Gambar 3.3 Distribusi tegangan persegi ekuivalen dari Whitney.

Dari gambar 3.3 dapat dihitung,

$$C = (0,85f'_c) (a) (b)$$

$$= (0,85f'_c) (\beta_1.c) (b) \dots\dots\dots 3.5$$

$$T = A_s.f_y \dots\dots\dots 3.6$$

Penggunaan f_y diasumsikan bahwa tulangan tarik meleleh sebelum beton mencapai regangan hancur, atau dikenal dengan keruntuhan liat.

Keseimbangan gaya $\Sigma (H) = 0$ menghasilkan tinggi blok tegangan persegi ekuivalen a sebagai berikut :

$$C = T$$

$$(0,85 f'_c) (a) (b) = A_s.f_y$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{(0,85 f'_c) (b)} \dots\dots\dots 3.7$$

Keseimbangan gaya-dalam $C = T$ yang membentuk suatu kopel momen dengan jarak $Z = d - a/2$ tersebut, menghasilkan kuat lentur nominal M_n seperti berikut :

$$M_n = C.Z$$

$$= (0,85 f'_c) (b) (a) (d - a/2)$$

Dengan mensubstitusikan a dari persamaan (3.7) ke dalam persamaan di atas, akan menyederhanakan persamaan rumus M_n , yakni:

$$M_n = (0,85 f'_c) (b) \left(\frac{A_s \cdot f_y}{(0,85 f'_c) (b)} \right) \left(d - \frac{A_s \cdot f_y}{2(0,85 f'_c) (b)} \right)$$

$$= A_s \cdot f_y \left(d - 0,59 \frac{A_s \cdot f_y}{(f'_c \cdot b)} \right) \dots\dots\dots 3.8$$

Dapat dilihat bahwa angka 0,59 mewakili besaran gabungan k_2/k_1k_3 dalam persamaan (3.4a) yang diperoleh dari gambar 3.2, yakni parameter "Padat Tegangan". Perhitungan M_n ini didasarkan atas asumsi bahwa baja tulangan telah mencapai regangan serta tegangan luluh sebelum beton mencapai regangan batas maksimum $\epsilon_{cu} = 0,003$. Selanjutnya, kuat Rencana ("*design strength*") adalah kuat lentur nominal dikalikan dengan suatu faktor reduksi ϕ , yakni

$$M_R = \phi M_n$$

Pemakaian faktor ϕ dimaksudkan untuk memperhitungkan kemungkinan penyimpangan terhadap kekuatan bahan, pengerjaan, ketidaktepatan ukuran, pengendalian dan pengawasan pelaksanaan. Standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.2.3 ayat 2 memberikan faktor reduksi kekuatan ϕ untuk berbagai mekanisme, antara lain sebagai berikut :

1. Lentur tanpa beban aksial 0,8
2. Beban aksial dan beban aksial dengan lentur (untuk beban aksial dengan lentur, kedua nilai kekuatan nominal dari beban aksial dan momen harus dikalikan dengan suatu nilai ϕ yang sesuai) :
 - a. aksial tarik dan aksial tarik dengan lentur 0,8
 - b. aksial tekan dan aksial tekan dengan lentur.

Komponen struktur dengan tulangan spiral maupun sengkang ikat
 0,7

Komponen struktur dengan tulangan sengkang biasa	0,65
3. Geser dan torsi	0,6
4. Tumpuan pada beton	0,7

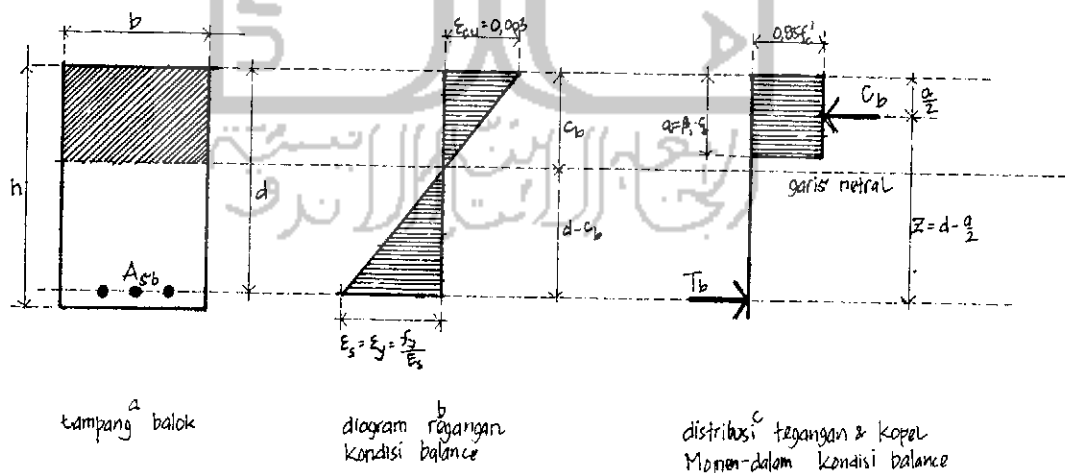
3.2. Balok Bertulang Seimbang

Pada suatu kondisi balok menahan beban sedemikian sehingga regangan tekan lentur beton maksimum ($\epsilon'_c \text{ max}$) mencapai harga 0,003 bersamaan dengan dicapainya regangan luluh baja $\epsilon_y = f_y / E_s$ yang berarti juga tegangan luluhnya. Hal demikian, penampang dinamakan mencapai keadaan Regangan Berimbang. Pada gambar 3.4 memperlihatkan sejumlah luas tulangan tarik A_{sb} akan mempengaruhi jarak garis netral c_b untuk mencapai keadaan berimbang tersebut.

Apabila luas tulangan baja tarik yang ada (A_s) lebih besar dari luas baja tulangan tarik untuk mencapai keadaan berimbang (A_{sb}), maka keseimbangan dari gaya-dalam C=T akan mengakibatkan kedalaman blok tegangan tekan ekuivalen a naik (membesar). Dengan naiknya nilai a akan naik pula nilai c melampaui c_b (Jarak garis netral dari serat tepi tekan untuk mencapai keseimbangan regangan), sehingga regangan tarik baja ϵ_s lebih kecil dari regangan luluh baja ϵ_y saat $\epsilon_{cu} = 0,003$, atau dengan kata lain bahwa beton mendahului mencapai regangan maksimum $\epsilon_{cu} = 0,003$ sebelum tulangan baja tarik

luluh. Keadaan demikian akan mengakibatkan kehancuran getas, yakni kehancuran mendadak yang tidak diawali tanda-tanda melendutnya elemen struktur tersebut.

Kondisi yang lain, yakni A_s lebih kecil dari A_{sb} . Kondisi ini mengakibatkan T mengecil, sehingga keseimbangan gaya-dalam akan mengurangi ketinggian kedalaman blok tegangan tekan ekuivalen a dan $c < c_b$ yang akan memberikan nilai $\epsilon_s > \epsilon_y$ sebelum regangan tekan beton mencapai nilai $\epsilon_{cu} = 0,003$. Keadaan demikian akan memberikan kehancuran liat atau kehancuran daktail, yakni kehancuran yang diawali dengan melendutnya elemen struktur tersebut.



Gambar 3.4. Tampang balok dan diagram regangan-tegangan kondisi seimbang regangan atau kondisi balance

Dari gambar 3.4 diperoleh persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$C_b = (0,85 f'_c) (\beta_1 \cdot c_b) (b) \dots\dots\dots 3.9$$

$$T_b = A_{sb} \cdot f_y \dots\dots\dots 3.10$$

c_b dapat diperoleh dengan menggunakan segitiga sebanding dari diagram regangan,

$$\begin{aligned} \frac{c_b}{d} &= \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \frac{f_y}{E_s}}, \text{ dengan } E_s = 200.000 \text{ MPa, maka} \\ c_b &= d \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{200.000}} \\ &= d \frac{600}{600 + f_y} \dots\dots\dots 3.11 \end{aligned}$$

Dari keseimbangan gaya-dalam $C_b = T_b$, maka rasio penulangan balance ρ_b dapat dicari sebagai berikut :

$$\begin{aligned} C_b &= T_b \\ (0,85 f'_c) \cdot (\beta_1 \cdot c_b) \cdot (b) &= (\rho_b \cdot b \cdot d) \cdot f_y \\ \rho_b &= \frac{(0,85 f'_c) \cdot (\beta_1 \cdot c_b) \cdot (b)}{b \cdot d \cdot f_y} \end{aligned}$$

Selanjutnya dengan mensubstitusikan c_b dari persamaan (3.11) ke dalam persamaan di atas menghasilkan ρ_b sebagai berikut:

$$\rho_b = \frac{0,85 f'_c \cdot \beta_1}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \dots\dots\dots 3.12$$

Dengan demikian luas baja tulangan untuk mencapai keadaan berimbang adalah:

$$A_{sb} = \rho_b \cdot b \cdot d$$

$$= 0,85 (f'_c / f_y) \beta_1 \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right) b \cdot d \dots\dots\dots 3.13$$

3.3. Batasan Daktilitas Suatu Tampang Balok

Dua macam kehancuran seperti yang tertulis di atas, adalah kehancuran yang diawali dengan melendutnya elemen struktur (hancur liat atau hancur daktil), dan kehancuran getas, yakni kehancuran mendadak tanpa diawali dengan tanda-tanda melendutnya elemen struktur.

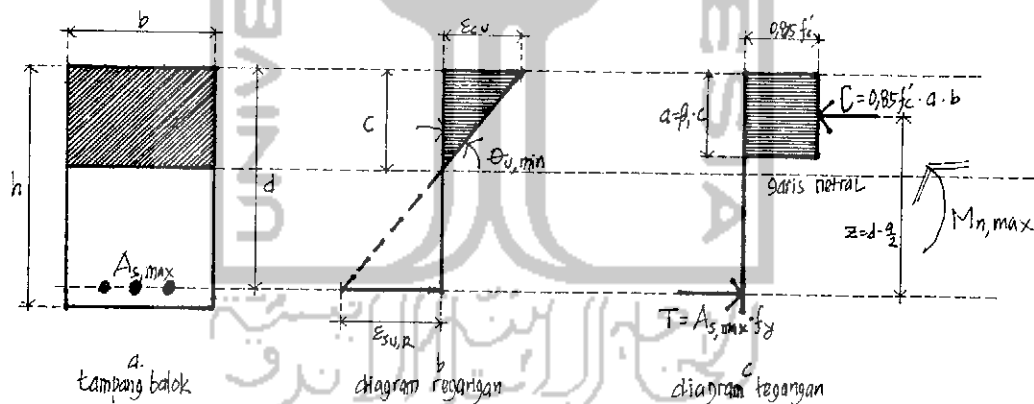
Untuk menjamin pola kehancuran yang daktil (liat), maka SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.3 dan ACI Building CODE pasal 10.3.3 membatasi jumlah tulangan tarik A_s tidak boleh melebihi 0,75 dari jumlah baja tarik untuk mencapai keseimbangan regangan A_{sb} .

$$A_s \leq A_{s,max} , \text{ dengan } A_{s,max} = 0,75 \cdot A_{sb}$$

Rasio penulangan maksimum $\rho_{max} = 0,75 \rho_b$

Persyaratan ini sekaligus sebagai batasan dari daktilitas minimum yang disarankan, atau merupakan level terendah dari daktilitas yang disarankan oleh kedua standar tersebut. Selain dari daktilitas yang

disyaratkan oleh SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE, persyaratan lain yang harus dipenuhi dalam mengacu pada sifat kelayakan ("serviceability") adalah membatasi lendutan yang berlebihan. Level terendah atau batas regangan minimum tersebut ternyata masih dapat diperkecil lagi dalam batas keamanan yang diperkenankan. Oleh karena itu ditetapkan suatu batas regangan minimum baja tarik ($\epsilon_{su,min}$) di luar ketentuan ACI dan SK SNI tersebut. Pada kasus balok T, penulis mencoba mereduksi $\epsilon_{su,T}$ dengan $\epsilon_{su,R}$, sehingga lendutan yang terjadi dapat diperkecil. Balok tampang empat persegi panjang saat kondisi kuat lentur maksimum diilustrasikan dalam gambar 3.5.



Gambar 3.5 Balok tampang empat persegi panjang pada kondisi kuat lentur maximal.

Dari gambar 3.5, dan dengan menggunakan keseimbangan gaya $\Sigma (H) = 0$ dapat diperoleh rumus-rumus batas kelengkungan minimum $\phi_{u,min}$ dan batas regangan minimum baja tarik untuk tampang empat persegi panjang $\epsilon_{su,R}$. Keseimbangan gaya $C=T$ tersebut menghasilkan tinggi blok tegangan ekuivalen a dan letak garis netral

berdasarkan $A_{s,max}$ sebagai berikut :

a berdasarkan $A_{s,max}$ adalah

$$a = \frac{A_{s,max} \cdot f_y}{0,85 f'_c \cdot b}$$

$c = \frac{a}{\beta_1}$, sehingga dengan mensubstitusikan persamaan a ke dalam persamaan c, akan menghasilkan

$$\begin{aligned} c &= \frac{A_{s,max} \cdot f_y}{0,85 f'_c \cdot b \cdot \beta_1} \\ &= \frac{\alpha \cdot A_{sb} \cdot f_y}{0,85 f'_c \cdot b \cdot \beta_1} \end{aligned} \quad \dots \quad 3.14$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.13) ke dalam persamaan (3.14) menghasilkan rumus c yang lebih sederhana, yakni

$$c = \alpha \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right) \cdot d \quad \dots \quad 3.14a$$

Perbandingan segitiga sebanding diagram regangan yang diilustrasikan

dalam gambar 3.5b menghasilkan rumus $\epsilon_{su,R}$ sebagai berikut :

$$\epsilon_{su,R} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right)$$

Substitusi persamaan 3.14a ke dalam persamaan di atas menghasilkan

rumus $\epsilon_{su,R}$.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{su,R} &= \left(\frac{d - \alpha \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \right) d}{\alpha \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \right) d} \right) \varepsilon_{cu} \\
 &= \frac{\varepsilon_{cu} \cdot d}{\left(\frac{\alpha \cdot \varepsilon_{cu} \cdot d}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \right) - \left(\frac{\alpha \cdot \varepsilon_{cu} \cdot d}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \right)} \\
 &= \frac{\varepsilon_{cu} \cdot d (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y)}{\alpha \cdot \varepsilon_{cu} \cdot d} - \varepsilon_{cu} \\
 &= \frac{\varepsilon_u}{\alpha} + \frac{\varepsilon_y}{\alpha} - \varepsilon_{cu}, \text{ sehingga} \\
 \varepsilon_{su,R} &= \varepsilon_{cu} \left[\left(\frac{1}{\alpha} \right) - 1 \right] + \frac{\varepsilon_y}{\alpha} \dots\dots\dots 3.15
 \end{aligned}$$

Kuat lentur nominal maksimum $M_{n,max}$ adalah kuat lentur nominal berdasarkan $A_{s,max}$ yang diperoleh dari keseimbangan gaya yang membentuk kopel momen tahanan-dalam seperti yang diilustrasikan dalam gambar 3.5c, yakni:

$$M_{n,max} = A_{s,max} \cdot f_y (d - a/2) \dots\dots\dots 3.16$$

Sedangkan batas kelengkungan minimum $\phi_{u,min}$ diperoleh dari diagram regangan pada gambar 3,5b seperti berikut :

$$\theta_{u, \min} = \frac{\epsilon_{cu} + \epsilon_{su,R}}{d} \dots\dots\dots 3.17$$

Untuk ratio daktilitas minimum yang diperkenankan adalah perbandingan antara batas kelengkungan minimum $\theta_{u, \min}$ dengan θ_y sebagai berikut :

$$A_{\min} = \frac{\theta_{u, \min}}{\theta_y} \dots\dots\dots 3.18$$

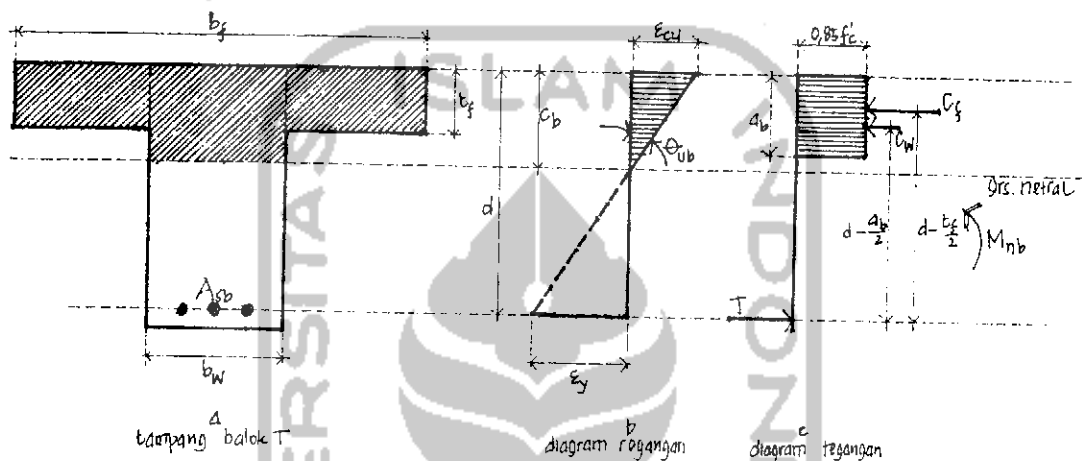
3.4. Analisa Lentur Tampang T

Di dalam analisa kuat lentur balok tampang-T garis netral akan terletak pada dua kemungkinan, yakni di dalam flens dan di bawah flens (di dalam badan balok).

Dengan demikian ada dua kemungkinan yang akan terjadi, blok tegangan tekan seluruhnya masuk di dalam daerah flens atau meliputi seluruh flens ditambah sebagian dari badan balok. Berdasarkan dua kemungkinan tersebut, maka ditetapkan dua terminologi analisis, yakni Balok T persegi dan Balok T murni.

Analisa balok T persegi dilakukan dengan cara seperti balok persegi biasa, akan tetapi menggunakan lebar flens efektif b_f , sebagai lebar balok dan dengan mengabaikan daerah tarik beton.

Sementara untuk balok tampang-T murni dilakukan dengan memperhitungkan blok tegangan tekan mencakup daerah kerja berbentuk huruf T. Kondisi keseimbangan regangan balok tampang-T diilustrasikan seperti pada gambar 3.6.



Gambar 3.6. Batok Tampang-T pada kondisi keseimbangan regangan

Dari gambar 3.6 dapat dihitung suatu resultante gaya-dalam, yakni resultante gaya tekan-dalam daerah flens C_f dan resultante gaya tekan dalam daerah badan balok C_w serta resultante gaya tarik-dalam T.

$$C_f = 0,85 f'_c \cdot t_f (b_f - b_w)$$

$$C_w = 0,85 f'_c \cdot a_b \cdot b_w$$

Letak garis netral untuk kondisi keseimbangan regangan diperoleh dari diagram regangan yang diilustrasikan pada gambar 3.6b seperti berikut:

$$c_b = d \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{sy}}$$

Keseimbangan gaya-dalam $C_{total} = T$ dari gambar 3.6c menghasilkan A_{sb} sebagai berikut :

$$C_{total} = 0,85 f'_c [t_f (b_f - b_w) + a_b \cdot b_w]$$

$T = A_{sb} \cdot f_y$, sehingga diperoleh A_{sb} sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_{sb} &= \frac{C_{total}}{f_y} \\ &= 0,85 \frac{f'_c}{f_y} \cdot [t_f (b_f - b_w) + a_b \cdot b_w] \dots\dots\dots 3.19 \end{aligned}$$

$$A_{s,max} = \alpha \cdot A_{sb} \dots\dots\dots 3.20$$

dengan $\alpha = 0,75$ (SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.3 dan ACI Building CODE pasal 10.3.3).

Sedangkan luas baja tulangan yang seimbang dengan beton desak bagian flens adalah:

$$A_{sf} = 0,85 \frac{f'_c}{f_y} t_f (b_f - b_w)$$

Rasio penulangan untuk kondisi keseimbangan regangan adalah

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{b_f \cdot d}$$

Batas kelengkungan θ_{ub} dan rasio daktilitas μ_b untuk kondisi keseimbangan regangan masing-masing adalah :

$$\theta_{ub} = \frac{\epsilon_{cu} + \epsilon_y}{d} , \quad \mu_b = \frac{\theta_{ub}}{\theta_y} = 1$$

Kuat lentur nominal untuk kondisi keseimbangan regangan dihitung berdasarkan kopel momen tahanan dalam yang diilustrasikan dalam gambar 3.6c sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M_n &= C_w (d - a/2) + C_f (d - t_f/2) \\ &= (A_{sb} - A_{sf}) f_y (d - a/2) + A_{sf} \cdot f_y (d - t_f/2) \end{aligned}$$

Batasan daktilitas minimum untuk tampang-T seperti yang telah ditetapkan oleh peraturan adalah sama dengan daktilitas minimum pada tampang empat persegi panjang, yakni

$$A_s \leq A_{s,max}$$

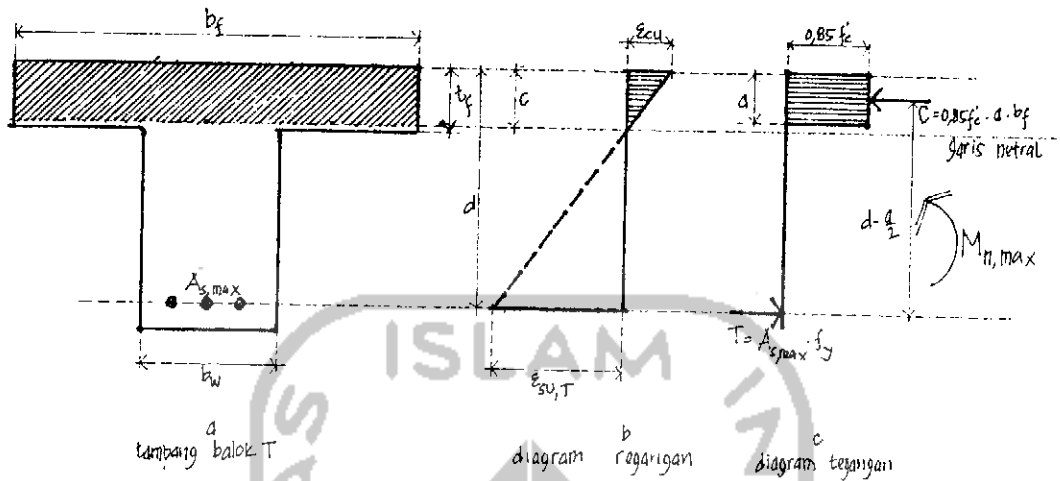
dengan $A_{s,max} = \alpha \cdot A_{sb}$

kemudian $\rho_{max} = \alpha \cdot \rho_b$

Sedangkan besarnya daktilitas atau lendutan yang disarankan pada suatu tampang balok agar tercapai sifat kelayakan yang memuaskan akan diuraikan pada sub bab berikutnya, yakni daktilitas yang dikaitkan dengan batas regangan minimum yang ditetapkan pada baja tarik $\epsilon_{su,min}$ untuk suatu tampang berdasarkan $A_{s,max}$.

3.4.1. Balok Tampang T Persegi

Balok tampang-T persegi tercapai apabila tinggi blok tegangan ekuivalen $a <$ tebal flens t_f . Untuk mendapatkan rumus-rumus yang ada, analisa didasarkan atas $A_s = A_{s,max}$ dengan $A_{s,max} = \alpha \cdot A_{sb}$



Gambar 3.7. Balok Tampang-T pada kondisi kuat lentur max, $a \leq t_f$
 Untuk $A_s = A_{s,max}$

Keseimbangan gaya-dalam $C=T$ yang membentuk suatu kopel momen tahanan-dalam pada gambar 3.7c menghasilkan tinggi blok tegangan ekuivalen a dan kuat lentur nominal maksimum $M_{n,max}$ sebagai berikut :

$$0,85 f'_c \cdot b_f \cdot a = A_{s,max} \cdot f_y$$

$$a = \frac{A_{s,max} \cdot f_y}{0,85 f'_c \cdot b_f} \dots \dots \dots 3.21$$

$$M_{n,max} = A_{s,max} \cdot f_y \cdot (d - a/2)$$

Batas regangan minimum baja tarik untuk tampang T $\epsilon_{su,T}$ berdasarkan $A_{s,max}$ Seperti yang disarankan oleh ACI Building CODE dapat dihitung dengan segitiga sebanding diagram regangan pada gambar 3.7b. Pertama, mencari letak garis netrat tampang berdasarkan $A_{s,max}$

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

Substitusi persamaan 3.20 dan 3.21 ke dalam persamaan c tersebut di atas menghasilkan rumus c sebagai berikut, yakni :

$$c = \frac{\alpha \cdot 0,85 \cdot (f'_c/f_y) [a_b \cdot b_w + t_f (b_f - b_w)] f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_f \cdot \beta_1}$$

$$c = \frac{\alpha \cdot [a_b \cdot b_w + t_f (b_f - b_w)]}{b_f \cdot \beta_1} \dots \dots \dots 3.22$$

Selanjutnya, dari segitiga sebanding diagram regangan pada gambar 3.7b didapat persamaan

$$\epsilon_{su,T} = \epsilon_{cu} \frac{(d-c)}{c}$$
 Apabila persamaan 3.22 disubstitusikan ke dalam persamaan $\epsilon_{su,T}$ tersebut akan menghasilkan rumus $\epsilon_{su,T}$ sebagai berikut :

$$\epsilon_{su,T} = \epsilon_{cu} \frac{(d-c)}{c}$$

$$= \epsilon_{cu} \left(\frac{d - \frac{\alpha [a_b \cdot b_w + t_f (b_f - b_w)]}{b_f \cdot \beta_1}}{\frac{\alpha [a_b \cdot b_w + t_f (b_f - b_w)]}{b_f \cdot \beta_1}} \right) \text{ sehingga}$$

$$\epsilon_{su,T} = \epsilon_{cu} \left(\frac{1}{\alpha \left[\frac{b_w}{b_f} \right] \left[\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right] + \left[\frac{\alpha}{\beta_1} \right] \left[\frac{t_f}{d} \right] \left[1 - \frac{b_w}{b_f} \right]} - 1 \right) \dots 3.23$$

Sedangkan batas kelengkungan minimum analog dengan persamaan (3.17), yakni :

$$\theta_{u,min} = \frac{\epsilon_{cu} + \epsilon_{su,T}}{d}$$

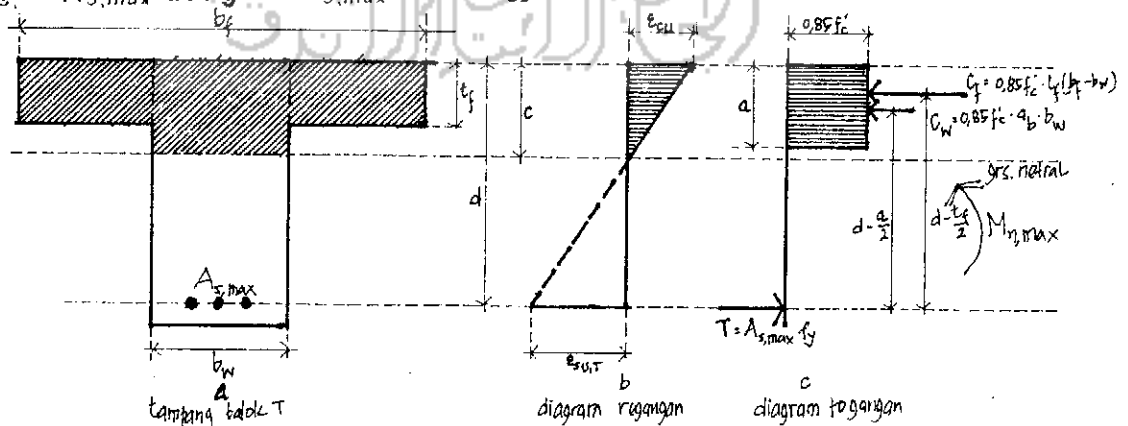
Ratiodaktilitas yang diperkenankan adalah

$$\mu_{min} = \frac{\theta_{u,min}}{\theta_y}$$

3.4.2. Balok Tampang-T Murni

Balokampang-T murni tercapai apabila tinggi blok tegangan ekivalen $a >$ tebal flens t_f . Untuk mendapatkan rumus-rumus yang diperlukan guna perhitungan tampang, analisa didasarkan atas

$$A_s = A_{s,max} \text{ dengan } A_{s,max} = a \cdot A_{sb}$$



Gambar 3.8. balok tampang - T murni pada kondisi kuat lentur max, $a >$ t_f untuk $A_s = A_{s,max}$

Untuk mencari a berdasarkan $A_{s,max}$ digunakan keseimbangan gaya dalam $C_{total} = T$ yang diilustrasikan pada gambar 3.8c.

$$C_{total} = T$$

$$0,85 f_c [a_b \cdot b_w + t_f (b_f - b_w)] = A_{s,max} \cdot f_y$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{[A_{s,max} \cdot f_y] - [0,85 f_c \cdot t_f (b_f - b_w)]}{0,85 f_c \cdot b_w} \\ &= \frac{A_{s,max} \cdot f_y}{0,85 f_c \cdot b_w} - \frac{[0,85 f_c \cdot t_f \cdot b_f] - [0,85 f_c \cdot t_f \cdot b_w]}{0,85 f_c \cdot b_w} \\ &= \frac{A_{s,max} \cdot f_y}{0,85 f_c \cdot b_w} - t_f \left(\frac{b_f}{b_w} - 1 \right) \dots\dots\dots 3.25 \end{aligned}$$

$M_{n,max}$ dicari berdasarkan kopel momen tahanan-dalam yang diilustrasikan pada gambar 3.8c.

$$M_{n,max} = [A_{s,max} - A_{sf}] f_y [d - a/2] + A_{sf} \cdot f_y [d - t_f/2]$$

$$\text{dengan } A_{sf} = 0,85 \frac{f_c}{f_y} t_f [b_f - b_w]$$

Batas regangan minimum baja tarik untuk tampang T $\epsilon_{su,T}$ berdasarkan $A_{s,max}$ yang disarankan oleh ACI Building CODE dapat dihitung dengan segitiga sebanding diagram regangan pada gambar 3.8b.

Pertama, mencari letak garisnetral tampang c berdasarkan $A_{s,max}$ sebagai berikut:

$$\text{letak garis netral } c = \frac{a}{\beta_1}$$

Substitusi persamaan (3.25) dan (3.20) ke dalam persamaan c tersebut di atas menghasilkan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} c &= \frac{\alpha \cdot 0,85 \cdot (f'_c/f_y) [a_b \cdot b_w + t_f (b_f - b_w)]}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_w \cdot \beta_1} - \frac{t_f}{\beta_1} \left(\frac{b_f}{b_w} - 1 \right) \\ &= \frac{\alpha \cdot [a_b \cdot b_w + t_f (b_f - b_w)]}{b_w \cdot \beta_1} - \frac{t_f}{\beta_1} \left(\frac{b_f}{b_w} - 1 \right) \\ &= \left(\frac{\alpha \cdot a_b}{\beta_1} + \frac{\alpha \cdot t_f \cdot b_f}{\beta_1 \cdot b_w} - \frac{t_f \cdot \alpha}{\beta_1} - \frac{t_f \cdot b_f}{\beta_1 \cdot b_w} + \frac{t_f}{\beta_1} \right) \dots\dots\dots 3.26 \end{aligned}$$

Selanjutnya, dari segitiga sebanding diagram regangan pada gambar 3.8b diperoleh persamaan $\epsilon_{su,T} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right)$. Substitusi persamaan (3.26) ke dalam persamaan $\epsilon_{su,T}$ tersebut menghasilkan rumus $\epsilon_{su,T}$ untuk tampang dengan kondisi $a > t_f$ sebagai berikut:

$$\epsilon_{su,T} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d - \left[\left(\frac{\alpha \cdot a_b}{\beta_1} \right) + \left(\frac{\alpha \cdot t_f \cdot b_f}{\beta_1 \cdot b_w} \right) - \left(\frac{t_f \cdot \alpha}{\beta_1} \right) - \left(\frac{t_f \cdot b_f}{\beta_1 \cdot b_w} \right) + \left(\frac{t_f}{\beta_1} \right) \right]}{\left(\frac{\alpha \cdot a_b}{\beta_1} \right) + \left(\frac{\alpha \cdot t_f \cdot b_f}{\beta_1 \cdot b_w} \right) - \left(\frac{t_f \cdot \alpha}{\beta_1} \right) - \left(\frac{t_f \cdot b_f}{\beta_1 \cdot b_w} \right) + \left(\frac{t_f}{\beta_1} \right)} \right)$$

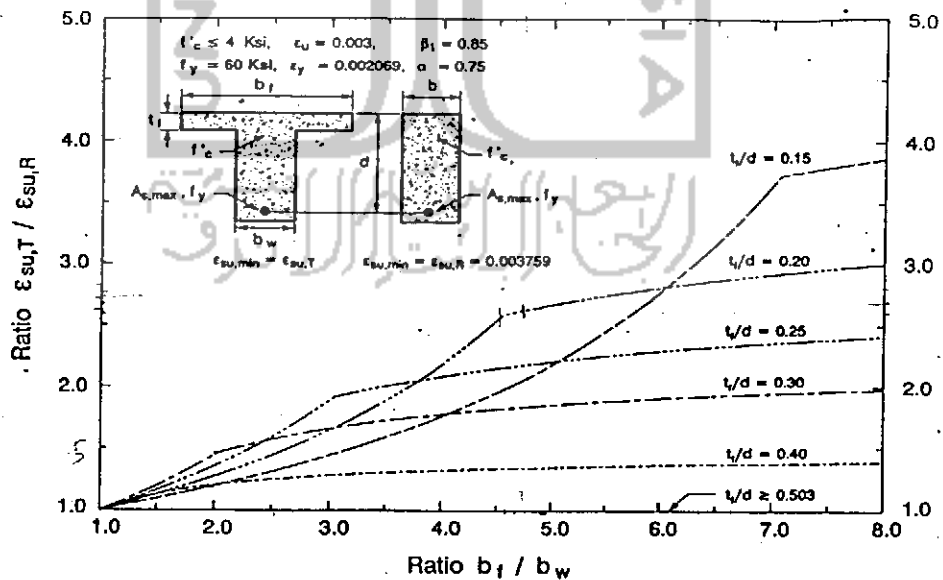
sehingga

$$\epsilon_{su,T} = \epsilon_{cu} \left(\frac{1}{\alpha \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right) + \left(\frac{\alpha - 1}{\beta_1} \right) \left(\frac{t_f}{d} \right) \left(\frac{b_f}{\beta_w} - 1 \right)} - 1 \right) \dots\dots\dots 3.27$$

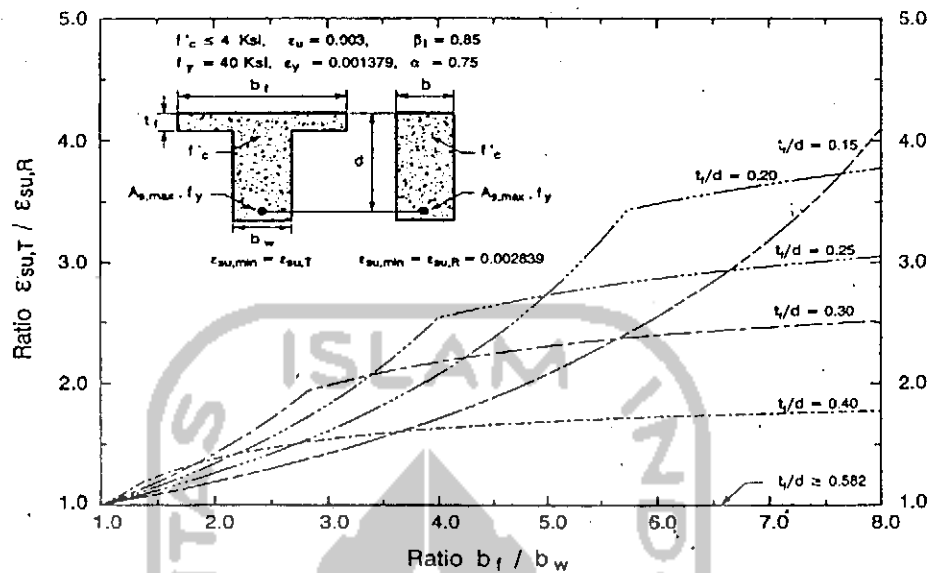
3.4.3. Ratio Regangan Baja Tulangan $\epsilon_{su,T} / \epsilon_{su,R}$

Untuk kedua kasus balok T persegi dan balok T murni, nilai dari $\epsilon_{su,min}$ untuk tampang T $\epsilon_{su,T}$ dan nilai $\theta_{u,min}$ selain dipengaruhi oleh beberapa parameter ϵ_{cu} , ϵ_y dan α seperti pada tampang empat persegi panjang juga dipengaruhi oleh ratio-ratio b_f/b_w dan t_f/d .

Perhitungan ratio $\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$ sebagai fungsi dari b_f/b_w untuk berbagai nilai t_f/d hasilnya diilustrasikan dalam gambar 3.9 dan 3.10.



Gambar 3.9 Variasi ratio ($\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$), dengan (b_f/b_w) untuk beberapa nilai t_f/d dan mutu baja tulangan 60 (414 Mp_a)



Gambar 3.10 Variasi ratio ($\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$), dengan (b_f/b_w) untuk beberapa nilai t_f/d dan mutu baja tulangan 40.

Pada gambar 3.9 diperlihatkan hasil disain suatu tampang balok T untuk $f'_c \leq 28 \text{ MPa}$ dan $f_y = 414 \text{ MPa}$ serta $\alpha = 0,75$. Untuk semua nilai ratio $t_f/d < 0,503$, nilai ratio ($\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$) > 1 . Hal ini menunjukkan bahwa tampang-T yang didisain memenuhi persyaratan SK SNI maupun ACI Building CODE akan selalu mempunyai lendutan yang relatif besar.

Dalam gambar 3.10 balok didisain dengan menggunakan baja tulangan yang lebih rendah tegangan luluhnya, yakni $f_y = 276 \text{ MPa}$. Perhitungan memperlihatkan suatu hasil yang sama dengan disain pada gambar

3.9 , yakni $((\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R})) > 1$, akan tetapi mempunyai nilai $\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$ yang lebih besar. Kurva-kurva tersebut di atas (gambar 3.9 dan 3.10) dibuat untuk dua bagian yang berbeda, yakni kurva cekung sebagai permulaannya berkaitan dengan batok tampang-T murni dan kurva cembung berkaitan dengan balok tampang T persegi. Dari perhitungan disain yang diilustrasikan dalam kedua gambar tersebut menyatakan bahwa ratio $\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$ akan selalu naik dengan naiknya nilai b_f/b_w walaupun tanpa menghiraukan ratio t_f/d . Nilai maksimum $\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$ dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$\left(\frac{\epsilon_{su,T}}{\epsilon_{su,R}} \right)_{\max} = \frac{\frac{\beta_1}{(t_f / d)} - \alpha}{1 - \alpha + \frac{s_y}{\epsilon_{cu}}} \quad \text{3.28}$$

Nilai maksimum teoritis untuk ratio $\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$ dapat dilihat dalam tabel 1, yang mana untuk disain praktis digunakan limit $(b_f/b_w) = 8$.

Tabel 1. Harga maksimum ratio ($\epsilon_{su,T} / \epsilon_{su,R}$)

ratio t_f/d	baja derajat 60		baja derajat 40	
	disain praktis	teoritis	disain praktis	teoritis
	$(b_f/b_w) = 8$	$(b_f/b_w) = \sim$	$(b_f/b_w) = 8$	$(b_f/b_w) = \sim$
0.15	3.86	5.23	4.10	6.93
0.20	3.00	3.72	3.78	4.93
0.25	2.41	2.82	3.05	3.73
0.30	1.98	2.22	2.52	2.94
0.40	1.39	1.46	1.78	1.94
> 0.503	1.00	1.00	-	-
> 0.582	-	-	1.00	1.00

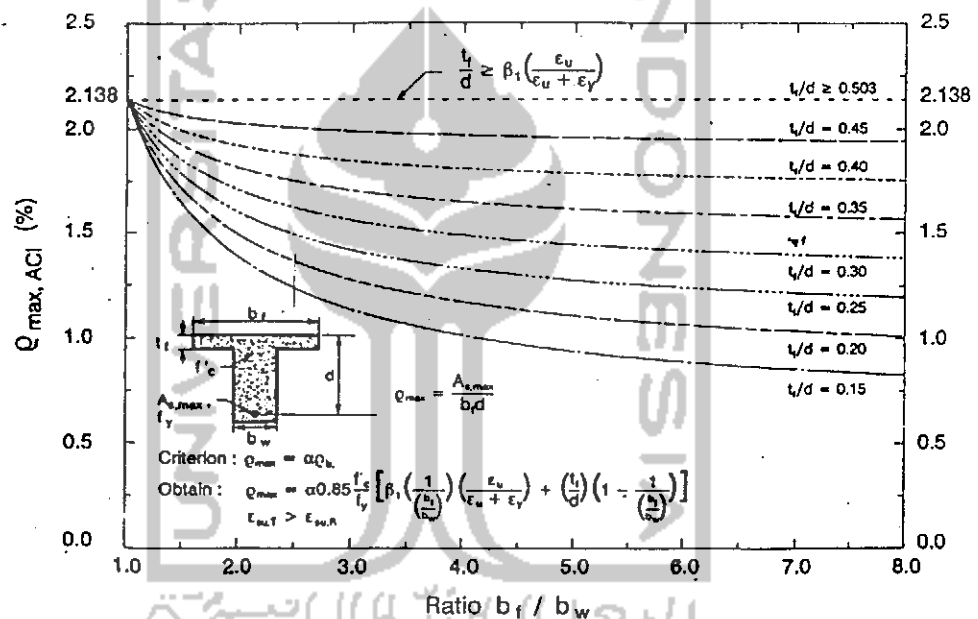
Catatan : disain untuk $f'_c \leq 28 \text{ Mpa}$; $\beta_1 = 0,85$; $\alpha = 0,75$; $\epsilon_y = 0,002069$ dan $\epsilon_{cu} = 0,003$.

Untuk $(b_f/b_w) = 8$ dan $(t_f/d) = 0,15$, ratio $\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R}$ kurang lebih mendekati nilai 4 untuk tulangan baja dengan derajat 60 maupun 40. Hal ini menggambarkan bahwa regangan baja tulangan untuk tampang T empat kali lebih besar dari regangan baja tulangan balok tampang empat persegi panjang. Dengan demikian lendutan pada balok tampang T yang didisain dengan mengikuti SK SNI maupun ACI



Building CODE relatif besar, walaupun masih dalam batas-batas keamanan.

Dengan naiknya nilai ratio b_f/b_w pada tampang-T yang memenuhi persyaratan SK SNI maupun ACI Building CODE akan menyebabkan suatu reduksi pada nilai maksimum ρ_{max} . Hal ini diilustrasikan dalam gambar 3.11.

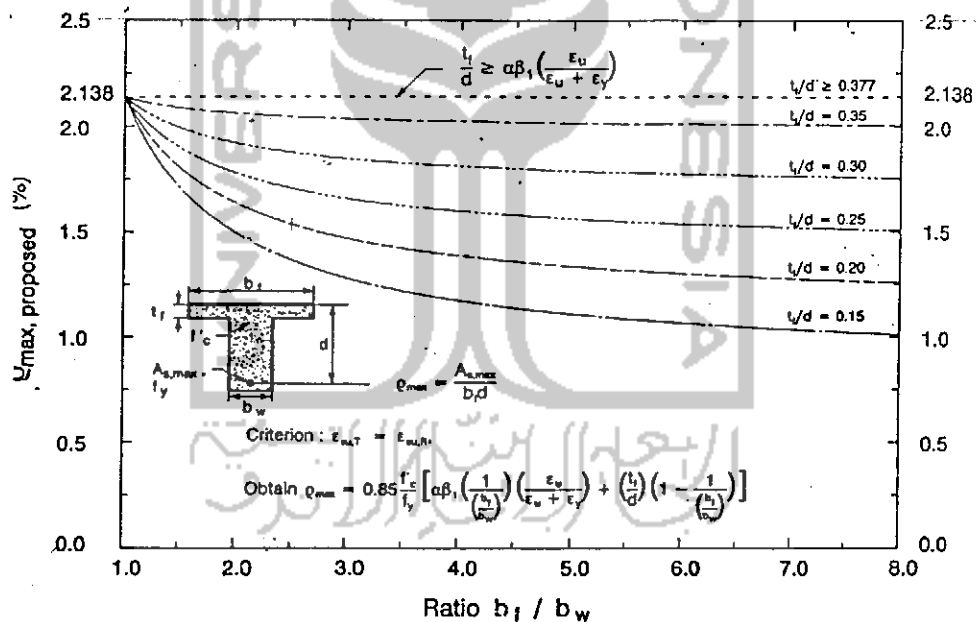


Gambar 3.11 Variasi nilai ρ_{max} (disain ACI) dengan (b_f/b_w) untuk beberapa harga t_f/d ; $f'_c = 28 \text{ Mpa}$; $f_y = 414 \text{ Mpa}$; $\beta_1 = 0,85$; $\alpha = 0,75$; $\epsilon_{cu} = 0,003$; dan $\epsilon_y = 0,002069$

Dari gambar 3.11 dapat dibaca nilai maksimum $\rho_{max} = 2,138\%$ dicapai pada ratio $(b_f/b_w) = 1$ (balok tampang empat persegi panjang) dan beberapa tampang T untuk $(t_f/d) \geq (\beta_1 \cdot \epsilon_{cu}) / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y)$ untuk semua

nilai b_f/b_w . Sedang untuk beberapa nilai untuk $(t_f/d) < (\beta_1 \cdot \epsilon_{cu}) / (\epsilon_{cu} + \epsilon_y)$, nilai ρ_{max} akan turun seiring dengan naiknya ratio b_f/b_w .

Nilai ρ_{max} yang lebih besar akan dapat diperoleh apabila suatu disain balok tampang-T diperbolehkan mereduksi daktilitas minimum sebagaimana pada balok tampang empat persegi panjang, yakni bila $\epsilon_{su,T} = \epsilon_{su,R}$, sehingga lendutan pada balok tampang-T dapat lebih dikendalikan. Nilai ρ_{max} tersebut diilustrasikan dalam gambar 3.12.



Gambar 3.12 Variasi nilai ρ_{max} (disain yang diusulkan) dengan (b_f/b_w) untuk beberapa nilai t_f/d dimana $\epsilon_{cu,T} = \epsilon_{cu,R}$; $f_c' = 28$ MPa; $\beta_1 = 0,85$; $\alpha = 0,75$; $\epsilon_{cu} = 0,003$; dan $\epsilon_y = 0,002069$

Perbandingan kurva-kurva dalam gambar 3.11 dan 3.12 adalah bahwa kurva pada gambar 3.12, yakni kurva disain balok tampang-T yang mereduksi daktilitas minimum sebagaimana balok tampang empat persegi panjang menunjukkan harga ρ_{max} yang lebih besar dari pada harga ρ_{max} disain yang memenuhi ketetapan SK SNI dan ACI Building CODE seperti pada gambar 3.11.



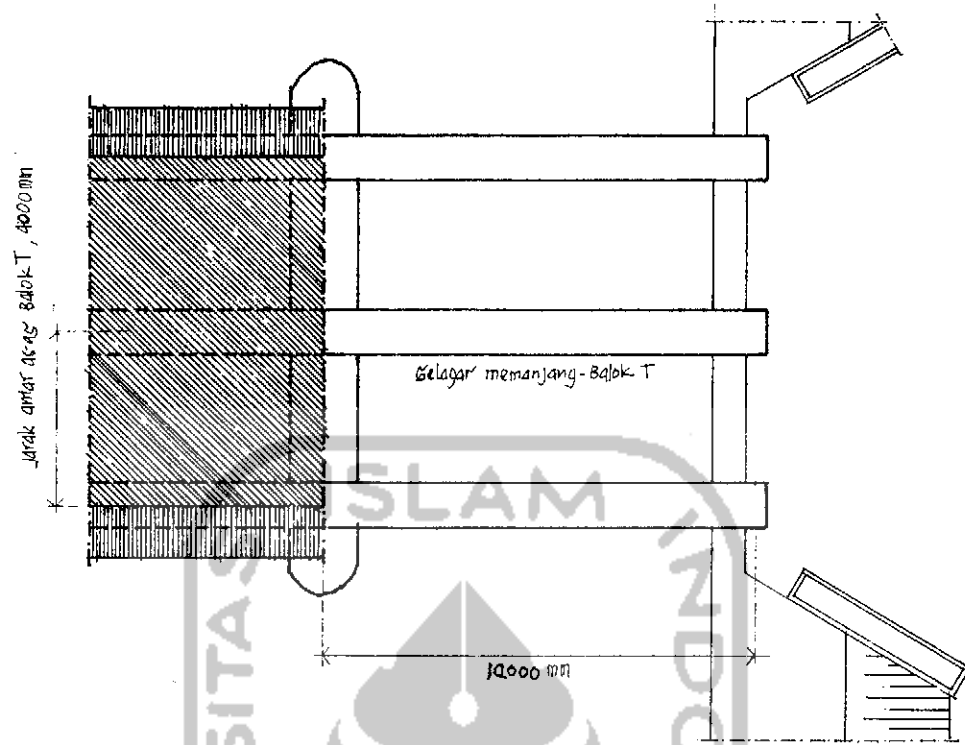
BAB IV

DISAINS BALOK T

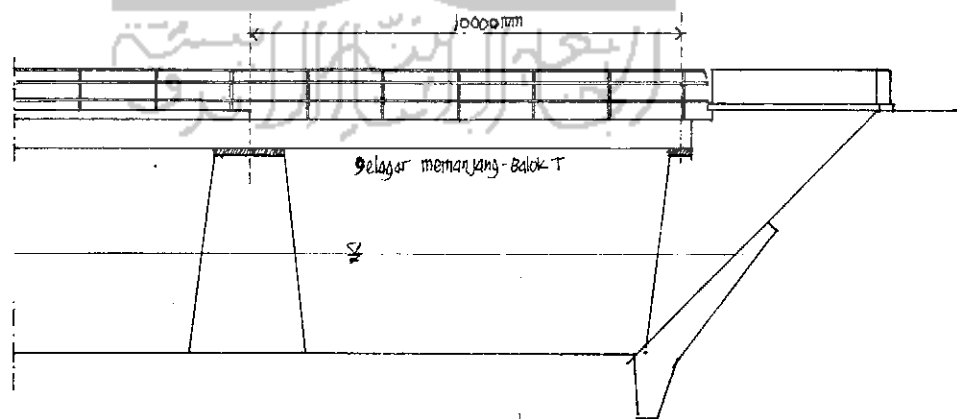
4.1. Data dan Asumsi Disain

Balok sebagai salah satu elemen struktur bangunan dirancang sedemikian rupa sehingga dapat menghasilkan suatu dimensi yang ideal. Perencanaan suatu balok yang harus mengikuti suatu bentuk dan ukuran seperti yang telah tergambar pada gambar arsitek, maka perencanaan balok dititik beratkan pada mutu beton dan perhitungan luas tulangan.

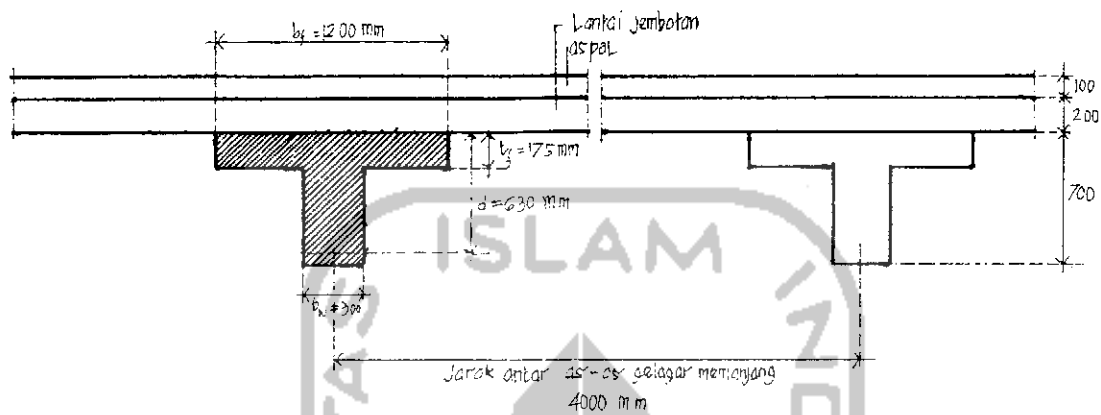
Pada prinsipnya, sebelum perhitungan perencanaan balok dilakukan, maka dibutuhkan data dan asumsi yang didasarkan pada bentuk, ukuran, fungsi, lokasi dan penggunaan material dari bangunan yang direncanakan. Pada penulisan tugas akhir ini, penulis mengambil sebuah contoh perencanaan balok T sebagai gelagar memanjang pada konstruksi jembatan. Konstruksi Jembatan ini direncanakan terdiri dari 2 bentang, yang masing-masing bentang ditumpu oleh perletakan sendi dan rol seperti terlihat pada gambar 4.1-4.3.



Gambar 4.1. Denah Jembatan



Gambar 4.2. Gambar potongan A-A



Gambar 4.3. Gambar rencana dimensi balok T

Struktur Jembatan ini terdiri dari plat lantai Jembatan yang ditumpu oleh gelagar memanjang yang dicetak sebagai balok T. Plat Jembatan diasumsikan setebal 200 mm dan sebagai asumsi awal dimensi balok adalah $b_w = 300$ mm dan $d = 630$ mm. Standard SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.1.10 dan ACI-8-10.2-4 (CHU-Kia Wang, 1993, jilid 1, hal.295) memberikan batasan lebar flens efektif balok-T untuk balok yang khusus dibentuk sebagai balok-T guna memperoleh tambahan luas daerah tekan tersebut sebagai berikut:

- lebar flens efektif $\leq 4 b_w$ (lebar badan balok)
- ≤ 4.300 mm
- ≤ 1200 mm

Dari batasan di atas, maka lebar flens efektif (b_f) diambil sebesar 1200 mm. Sedangkan tebal flens (t_f) adalah sebagai berikut

- tebal flens (t_f) $\geq \frac{1}{2} b_w$ (lebar badan balok)
- $\geq \frac{1}{2} 300 \text{ mm}$
- $\geq 150 \text{ mm}$

Dari batasan tersebut di atas, maka tebal flens flens (t_f) diambil sebesar 175 mm.

Perencanaan konstruksi beton ini mengacu pada peraturan yang berlaku, antara lain perencanaan didasarkan pada Pedoman Perencanaan Pembebanan Jembatan Jalan Raya tahun 1987 serta mengacu pada SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE.

Struktur Jembatan ini memiliki data yang lain, yakni mutu material yang dipergunakan dalam perancangan balok beton bertulang sebagai berikut:

Kuat tekan beton yang disyaratkan $f'_c = 4 Ks_i$
 $\sim 28 \text{ MP}_a$

tegangan luluh baja tulangan $f_y = 60 Ks_i$
 $\sim 414 \text{ MP}_a$

Regangan luluh baja tulangan $\epsilon_y = 0,00207$

Modulus elastik baja tulangan $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MP}_a$

Pada penulisan Tugas Akhir ini disain balok T hanya dilakukan pada balok tengah saja

4.2. Disain

4.2.1. Beban-bekan Yang Bekerja pada Balok

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, beban yang bekerja pada balok difokuskan pada beban primer saja, yakni terdiri dari beban mati, beban hidup serta beban kejut. Standard perhitungan pembebanan yang digunakan adalah Pedoman Perencanaan Pembebanan Jembatan Jalan Raya (PPPJJR) tahun 1987. Perhitungan beban yang bekerja pada balok tersebut adalah sebagai berikut:

1. Beban Mati

Nilai berat isi bahan-bahan bangunan dalam perhitungan beban mati ini sesuai dengan PPPJJR tahun 1987, Bab III, pasal 1 (1)

- Aspal $(0,1) (4,0) (2,0) = 0,8 \text{ ton/m'}$
- Slab beton (Lantai Jembatan) $(0,2) (4,0) (2,5) = 2,0 \text{ ton/m'}$
- Berat balok sendiri $[(1,2) (1,175) + (0,3) (0,525)] 2,5 = 0,91875 \text{ ton/m'}$
- Air hujan $(0,05) (4,0) (1,0) = 0,2 \text{ ton/m'}$
- Tiang Sandaran + pipa $0,05335 = 0,05335 \text{ ton/m'}$

- Trotoar + Kerb	0,3425	= 0,3425 ton/m'
- Lain-lain	0,2000	= 0,2 ton/m'
<hr/>		
qd		= 4,5 ton/m'
		= $4,5146 \times 10^4 \text{ N/m}'$

2. Beban Hidup

Dalam PPJJR tahun 1987 Bab III, pasal 1 (2) 2.4 ditetapkan bahwa susunan beban tiap jalur lalu lintas terdiri dari beban terbagi rata sebesar "q" ton per meter panjang per jalur, dan beban garis "P" ton per jalur lalu lintas tersebut.

panjang bentang struktur jembatan pada penulisan Tugas Akhir ini adalah $L = 10,0\text{m}$. Untuk panjang bentang $< 30\text{m}$, pasal tersebut di atas menetapkan besarnya beban terbagi merata beban bergaris masing-masing adalah

$$q = 2,2 \text{ ton/m}'$$

$$P = 12 \text{ ton}$$

3. Beban kejut

Dalam PPPJJR tahun 1987 Bab III pasal 1(3) disebutkan bahwa untuk memperhitungkan pengaruh-pengaruh getaran dan pengaruh-pengaruh lainnya, tegangan-tegangan akibat beban garis "P" harus dikalikan dengan koefisien kejut yang akan memberikan hasil

maximum, sedangkan beban merata "q" tidak dikalikan dengan koefisien kejut tersebut. Adapun koefisien kejut tersebut ditentukan dengan rumus sebagai berikut:

$$K = 1 + \frac{20}{(50 + L)}$$

dengan K = Koefisien kejut

L = panjang bentang (dalam penulisan TA ini L = 10,0 m)

$$\begin{aligned} K &= 1 + \frac{20}{(50 + 10)} \\ &= 1,3333 \end{aligned}$$

4. Distribusi beban

Dalam PPPJJR tahun 1987 Bab III, pasal 4(1) disebutkan bahwa beban mati yang digunakan dalam perhitungan kekuatan gelagar adalah berat sendiri plat dan sistem lainnya yang dipikul langsung oleh gelagar tersebut, dan dapat dianggap terbagi merata disemua gelagar. Sedangkan pada pasal 4(2) 2.2 disebutkan bahwa, dalam menghitung momen dan gaya lintang dianggap bahwa gelagar-gelagar mempunyai jarak dan kekuatan yang sama atau hampir sama, sehingga penyebaran beban "D" melalui lantai kendaraan ke gelagar-gelagar harus dihitung dengan cara (untuk perhitungan momen) sebagai berikut:

Gelagar hidup yang diterima oleh tiap gelagar adalah:

- beban merata: $q' = (q/2,75) \times \Omega \times S$

$$P' = (P/2,75) \times \Omega \times S$$

dengan S = jarak gelagar yang berdekatan (yang ditinjau)
dalam meter, diukur dari sumbu ke sumbu

Ω = faktor distribusi

= 1,00 bila kekuatan gelagar melintang tidak diperhitungkan.

P & q = seperti pada sub bab 4.2.1. pada penulisan tugas akhir ini.

Jadi rencana beban yang bekerja pada gelagar tersebut adalah sebagai berikut:

- beban mati (q_d) = $4,5146 \cdot 10^4$ N/m'
- beban hidup yang terdiri dari beban garis dan terbagi merata,

yakni beban garis $P'_{(L)} = \left[\frac{P}{2,75} \right] \times \Omega \times S \times K$

$$= \left[\frac{12}{2,75} \right] (1,0) (4,0) (1,3333)$$

$$= 23,2721 \text{ ton}$$

beban terbagi merata $q'_{(L)} = (q/2,75) \times \Omega \times S$

$$\left[\frac{2,2}{2,75} \right] (1,0) (4,0)$$

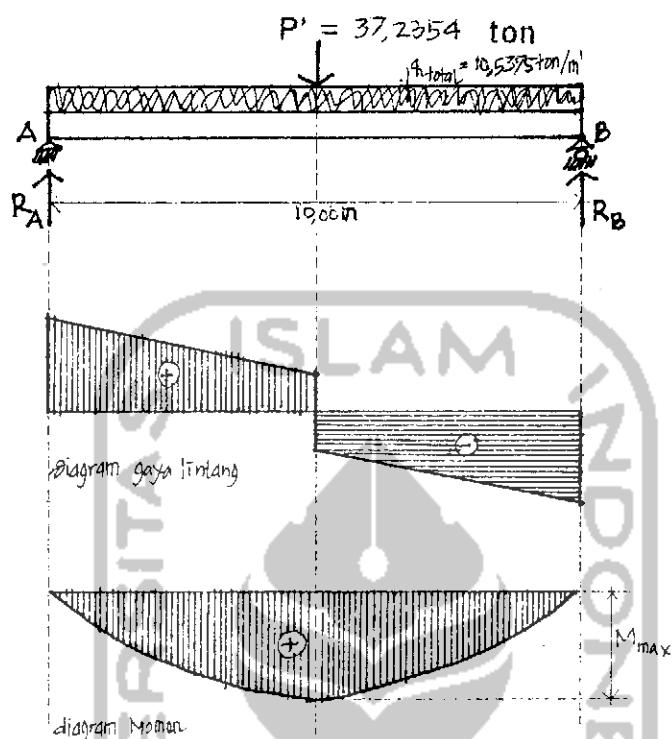
$$= 3,2 \text{ ton/m'}$$

4.2.2. Perhitungan Momen

Gelagar memanjang pada struktur jembatan ini ditumpu oleh dua perletakan yang berupa sendi dan rol. Sehingga perhitungan momen maupun gaya lintang dihitung menggunakan metode statis tertentu

Data:

- Panjang bentang $L = 10 \text{ m}$
- Beban bergaris $P' = 23,2721 \text{ ton}$
 Beban bergaris berfaktor $P'_u = (23,2721) (1,6)$
 $= 37,2354 \text{ ton}$
- Beban terbagi merata:
 - q_d (q beban mati) $= 4,5146 \text{ ton/m'}$
 - q_{du} $= (4,5146) (1,2)$
 $= 5,4175 \text{ ton/m'}$
 - q_L (q beban hidup) $= 3,2 \text{ ton/m'}$
 - q'_{Lu} $= (3,2) (1,6)$
 $= 5,12 \text{ ton/m'}$
- $q_{total} = 5,4175 + 5,12 = 10,5375 \text{ ton/m'}$



Gambar 4.4. Sistem beban, diagram gaya lintang dan Momen

Dari gambar 4.4. di atas dapat dihitung reaksi perletakan gaya geser (lintang) dan besarnya momen yang bekerja pada gelagar memanjang tersebut.

Reaksi perletakan struktur di atas adalah:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A + R_B - P' - (q_{\text{total}} \cdot L) = 0$$

$$\sum M_B = 0$$

$$R_B \cdot 0 + R_A \cdot L - P' \cdot \frac{1}{2} L = 0$$

$$R_A = \frac{P' + (q_{\text{total}} \cdot L)}{2}$$

$$R_A = \frac{37,2354 + 10,5375 \cdot 10}{2}$$

$$= 71,3052 \text{ ton}$$

$$R_B = R_A$$

Momen maximum terjadi ditengah bentang.

$$M_{\text{max}} = (1/8 \cdot q_{\text{total}} \cdot L^2) + (1/4 \cdot P' \cdot L)$$

$$\left[\frac{(10,5375)(10)^2}{8} \right] + \left[\frac{(37,2354)(10)}{4} \right]$$

$$= 224,80725 \text{ ton.m'}$$

$$= 224,80725 \text{ KN.m'}$$

4.2.3. Perencanaan Balok T Mengacu pada ACI Building CODE

Balok T sebagai gelagar memanjang pada struktur Jembatan ini didisain dengan mengacu pada peraturan ACI Building CODE maupun SK SNI T-15-1991-03, yakni mengacu pada "minimum ductility". Batasan "minimum ductility" atau daktilitas minimum yang disebutkan dalam dua peraturan tersebut antara lain adalah

$$A_s \leq A_{s,\text{max}}$$

$$\leq 0,75 \cdot A_{sb}, \text{ serta}$$

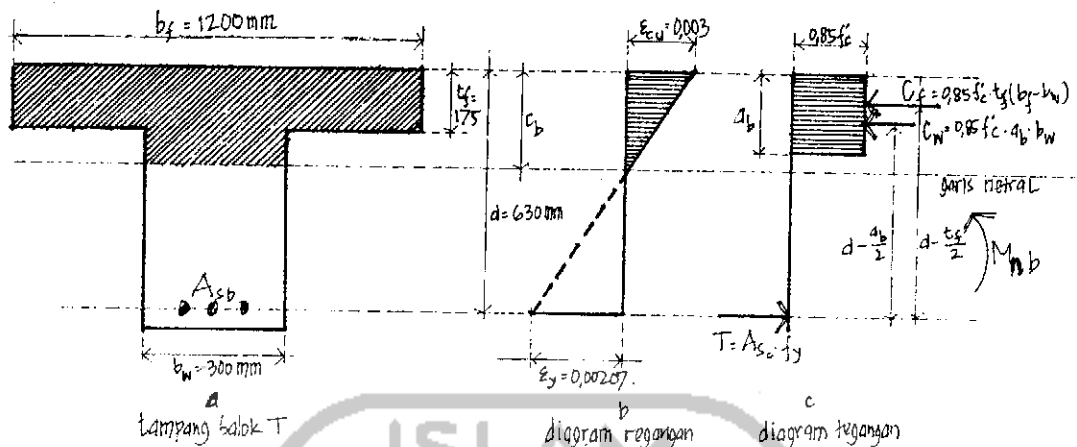
$$\rho_{\text{max}} \leq 0,75 \rho_b$$

Data yang diperlukan pada disain ini adalah sebagai berikut:

1. Rencana dimensi balok T yang disesuaikan dengan peraturan ACI Building CODE dan SK SNI T-15-1991-03 tentang lebar flens efektif (b_f) dan tebal flens (t_f), sedangkan lebar balok (b_w) dan tinggi efektif balok (d) diambil sebagai asumsi awal.

- $b_w = 300 \text{ mm}$
 - $d = 630 \text{ mm}$
 - $d' = 70 \text{ mm}$
 - $b_f = 1200 \text{ mm}$
 - $t_f = 175 \text{ mm}$
2. Beban dan spesifikasi bahan yang dipakai
 - M_{max} (M akibat beban luar) = 224,80725 KN . m'
 - $f_c = 4 \text{ Ksi} = 28 \text{ MP}_a$
 - $f_y = 60 \text{ Ksi} = 414 \text{ MP}_a$
 - $E_s = 2.10^5 \text{ MP}_a$
 - $\alpha = 0,75$
 - $\epsilon_{cu} = 0,003$
 - $\epsilon_y = 0,00207$
 - $\beta_1 = 0,85$
 - $\phi = 0,80$

Langkah awal disain untuk memenuhi pasal 10.3.3 dan 3.3.3 dari ACI Building CODE dan SK SNI T-15-1991-03 (yakni, $\rho_{max} = 0,75 \rho_b$) adalah mencari kondisi keseimbangan regangan (balans) dimensi balok tersebut.



Gambar 4.5. Balok tampang T Kondisi Keseimbangan Regangan

Jarak dari serat tepi tekan terluar ke garis netral untuk kondisi balans c_b adalah:

$$\begin{aligned}
 c_b &= d \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \\
 &= 630 \frac{0,003}{0,003 + 0,00207} \\
 &= 372,7810651 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Tinggi balok tegangan tekan kondisi balans a_b adalah

$$\begin{aligned}
 a_b &= \beta_1 \cdot c_b \\
 &= 0,85 \cdot 372,7810651 \\
 &= 316,8639 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Mencari luas tulangan kondisi balans A_{sb} dari gambar diagram pada gambar 4.5 adalah:

$$A_{sb} = 0,85 \frac{f_c}{f_y} [b_w \cdot a_b + t_f (b_f - b_w)]$$

$$= 0,85 \frac{f_c}{f_y} [(300) (316,8639) + (175) (1200 - 300)]$$

$$= 14.519,1021 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan maximum $A_{s,max}$ yang diperkenankan untuk mencapai kondisi kehancuran daktail disyaratkan oleh SK SNI dan ACI Building CODE adalah

$$A_{s,max} = \alpha \cdot A_{sb}$$

$$= (0,75) (14,519,1021)$$

$$= 10.889,3266 \text{ mm}^2$$

Sebelum mencari Momen Nominal Maximum $M_{n,max}$, terlebih dahulu menentukan besarnya tinggi blok tegangan tekan a berdasarkan asumsi bahwa $a > t_f$. Sehingga digunakan rumus 3.25 sebagai berikut:

$$a = \left[\frac{A_{s,max} \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c \cdot b_w} \right] - \left[t_f \left(\frac{b_f}{b_w} - 1 \right) \right]$$

$$= \left[\frac{(10.889,3266) (414)}{(0,85) (28) (300)} \right] - \left[(175) \left(\frac{1200}{300} - 1 \right) \right]$$

$$= 106,3979 \text{ mm}$$

Ternyata asumsi $a > t_f$ di atas tidak benar, yakni ($a = 106,3979 \text{ mm}$) $<$ ($t_f = 175 \text{ mm}$). Maka a dicari dengan kondisi tinggi blok

tegangan tekan $a < t_f$, yakni menggunakan rumus 3.21 sebagai berikut:

$$a = \frac{A_{s,max} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_f}$$

$$= \frac{(10.889,3266) (414)}{(0,85) (28) (1200)}$$

$$= 157,8495 \text{ mm (asumsi } a < t_f \text{ benar)}$$

Garis netral c berdasarkan kondisi dimensi balok T menggunakan luas tulangan maximum $A_{s,max}$ menjadi

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{157,8495}{0,85}$$

$$= 185,7053 \text{ mm}$$

Regangan yang terjadi dalam baja tulangan tarik bila ϵ_{cu} mencapai 0,003 adalah

$$\epsilon_{su} = \epsilon_{cu} \left[\frac{d}{c} - 1 \right]$$

$$= 0,003 \frac{630}{185,7053} - 1$$

$$= 0,007177416$$

Momen nominal maximum $M_{n,max}$ atau momen nominal dari dimensi balok T yang dipengaruhi oleh luas tulangan tarik maximum $A_{s,max}$ besarnya dapat dihitung dengan menggunakan rumus (kondisi $a < t_f$) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 M_{n,max} &= A_{s,max} \cdot f_y (d - \frac{1}{2}a) \\
 &= (10.889,3266) (10^{-6}) (414) (10^3) (0,63 - \frac{0,1578495}{2}) \\
 &= 2484,347089 \text{ KN} \cdot \text{m}'
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0,8M_{n,max} &= (0,8) (2484,347089) \\
 &= 1987,477671 \text{ KN} \cdot \text{m}'
 \end{aligned}$$

Karena $(0,8M_{n,max}) < (M_{max})$, maka dibutuhkan tambahan "bending strength" yang berupa tulangan baja A'_s dalam sayap tekan ("the compression flange") dan tulangan ΔA_s pada baja tulangan tarik.

Perhitungan tulangan tambahan A'_s dan ΔA_s tersebut adalah sebagai berikut:

Langkah awal, ditetapkan jarak baja tulangan tekan ke serat tepi tekan terluar $d' = 70 \text{ mm}$, sehingga regangan baja tulangan tekan ϵ'_s dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \epsilon'_s &= \epsilon_{cu} (1 - \frac{d'}{c}) \\
 &= 0,003 (1 - \frac{70}{185,7053}) \\
 &= 0,001869175
 \end{aligned}$$

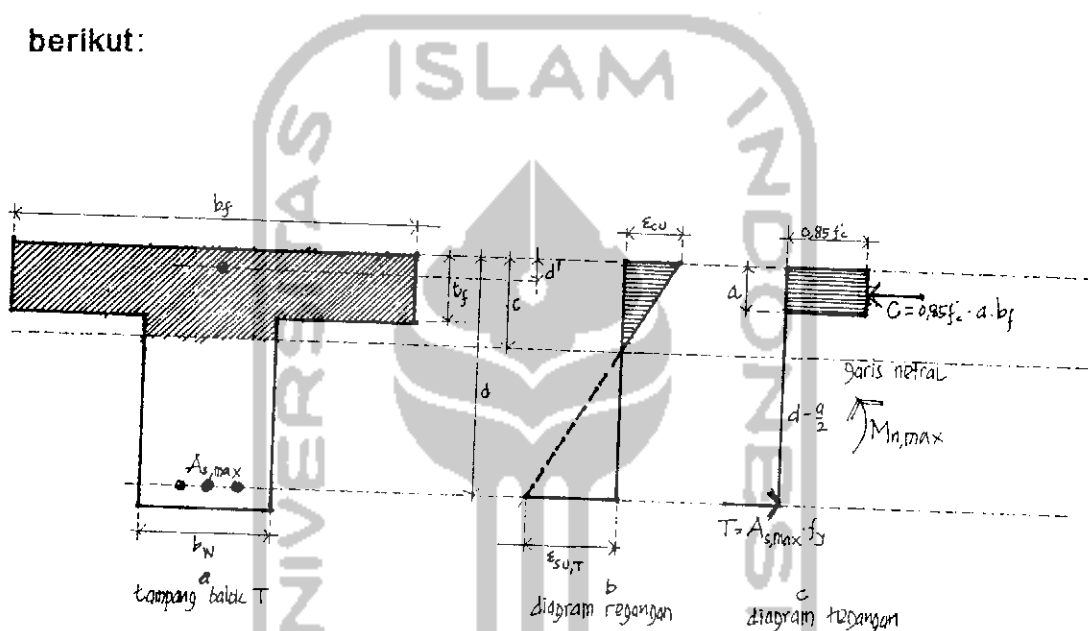
Karena regangan baja tulangan tekan yang terjadi

$(\epsilon'_s = 0,001869175) < (\epsilon_y = 0,00207)$, maka tegangan tekan baja tulangan $f'_s = \epsilon'_s \cdot E_s$

$$= (0,001869175) (200.000)$$

$$= 373,8352 \text{ MP}_a$$

Luas baja tulangan tekan A'_s yang dibutuhkan dapat dicari dengan bantuan gambar 4.6, sehingga terbentuk persamaan sebagai berikut:



Gambar 4.6. Balok Tampang berdasarkan $A_{s,max}$

Gambar di atas dapat dicari A'_s sebagai berikut:

$$0,8 \cdot A'_s (f'_s - 0,85 f'_c) (d - d') = M_{max} - 0,8 M_{n,max}$$

$$[2248,0725 - 1987,4777]$$

$$A'_s = \frac{[2248,0725 - 1987,4777]}{[0,8 ((373835,2 - 0,85 \times 28000) (0,63 - 0,07))]}$$

$$= 0,001661790 \text{ m}^2$$

$$= 1661,79 \text{ mm}^2$$

Dari gambar 4.6 dapat dihitung pula besarnya luas baja tarik tambahan ΔA_s sebagai berikut:

$$0,8 \cdot \Delta A_s \cdot f_y (d - d') = M_{\max} - 0,8 M_{n,\max}$$

$$\begin{aligned} \Delta A_s &= \frac{[2248,0725 - 1987,4777]}{[0,8 (414 \times 10^3) (0,63 - 0,07)]} \\ &= 0,001405036 \text{ m}^2 \\ &= 1405,036 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Kebutuhan luas baja tulangan yang diperlukan dalam mendisain balok T yang mengacu pada SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE ini adalah sebagai berikut:

- Luas baja tulangan tarik adalah $A_{s,\max} + \Delta A_s$
 $= 10.889,3266 + 1405,036$
 $= 12.294,3626 \text{ mm}^2$
- Luas baja tulangan tekan adalah $A'_s = 1661,79 \text{ mm}^2$

Jadi kebutuhan luas baja tulangan seluruhnya adalah $12.294,3626 + 1.661,79$
 $= 13.956,1526 \text{ mm}^2$

Daktilitas diukur dengan besarnya nilai $\epsilon_{su} = 0,007177416$. Nilai ϵ_{su} ini hampir dua kali lebih besar dari nilai yang diperlukan oleh suatu tampang empat persegi panjang $\epsilon_{su,R}$ yakni

$$\begin{aligned} \epsilon_{su,R} &= \epsilon_{cu} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) + \frac{\epsilon_y}{\alpha} \\ &= \left[0,003 \left(\frac{1}{0,75} - 1 \right) \right] + \left[\frac{0,00207}{0,75} \right] \\ &= 0,00376 \end{aligned}$$

Hal ini berhubungan dengan faktor kelayakan (serviceability) antara lain adalah lendutan yang berlebihan.

Ratio penulangan aktual (P_{aktual}) adalah

$$P_{aktual} = \frac{A_{s,max} + \Delta A_s}{b_r \cdot d}$$

$$= \frac{12.294,3626}{(1200)(630)}$$

$$= 0,016262384$$

$$= 1,63\%$$

Karena kondisi a yang membentuk tampang berupa tampang T persegi, maka ratio penulangan maximum (ρ_{max}) dihitung sebagai berikut:

$$\rho_{max} = 0,85 \frac{f_c}{f_y} \beta_1 \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y}$$

$$= (0,85) \left[\frac{28}{414} \right] (0,85) \left[\frac{0,003}{0,00507} \right]$$

$$= 0,02891$$

$$= 2,89\%$$

4.2.4. Disain Balok T Mengacu pada “Disain Usulan”

Gelagar memanjang pada pendisainan ini didisain untuk memenuhi daktilitas minimum yang ditetapkan pada tampang-tampang empat persegi panjang saja, yakni $\epsilon_{su,T} = \epsilon_{su,R}$

$$= 0,00376$$

Sehingga perhitungan c , a maupun $A_{s,max}$ tidak didasarkan pada kondisi keseimbangan regangan. Jarak dari serat tepi tekan terluar ke garis netral penampang balok T untuk kondisi disain usulan atau disain berdasarkan regangan $\epsilon_{su,R}$ ini adalah

$$\begin{aligned} c &= d \cdot \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{su,R}} \\ &= (630) \left(\frac{0,003}{(0,003 + 0,00376)} \right) \\ &= 279,5858 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tinggi blok tegangan tekan a berdasarkan disain usulan adalah

$$\begin{aligned} a &= \beta_1 \cdot c \\ &= (0,85) \cdot (279,5858) \\ &= 237,6479 \text{ mm} \end{aligned}$$

Karena $(a = 237,6479) > (t_f = 175)$, maka bagian beton tekan merupakan tampang T murni, serta mempunyai tegangan tekan merata $0,85 f'_c$.

Untuk memudahkan analisa, terutama dalam menghitung momen nominal maximum $M_{n,max}$, beton bagian tekan dipisahkan menjadi

dua bagian, yakni:

- bagian badan yang memberikan gaya tekan C_w ,
- bagian sayap yang memberikan gaya tekan C_f .

Sehingga luas baja tulangan untuk mengimbangi masing-masing bagian beton tekan tersebut dapat dihitung. Luas baja tulangan untuk mengimbangi beton tekan daerah flens adalah A_{sf} , yakni

$$\begin{aligned}
 A_{sf} &= 0,85 \frac{f_c}{f_y} t_f (b_f - b_w) \\
 &= 0,85 \frac{28}{414} \cdot 175 (1200 - 300) \\
 &= 9054,3478 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Sedangkan luas baja tulangan untuk mengimbangi beton tekan daerah badan balok adalah luas baja tulangan tarik maximum ($A_{s,max}$) - luas baja tulangan (A_{sf})

Luas baja tulangan tarik maximal ($A_{s,max}$) berdasarkan disain usulan adalah perhitungan yang didasarkan pada ketinggian blok tegangan tekan a seperti tersebut di atas. Sehingga tidak lagi menggunakan faktor $\alpha = 0,75$ sebagai pembatas tercapainya kondisi "daktilitas minimum" seperti di dalam batasan yang tercantum dalam SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE.

Luas baja tulangan tarik maximum $A_{s,max}$ tersebut sebagai berikut:

$$A_{s,max} = 0,85 \frac{f}{f_y} [b_w \cdot a + t_f (b_f - b_w)]$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,85 \frac{28}{414} [(300) (237,6479) + (175) (1200 - 300)] \\
 &= 0,013152913 \text{ m}^2 \\
 &= 13.152,913 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Sehingga $M_{n,max}$ dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 M_{n,max} &= [(A_{s,max} - A_{sf}) f_y (d - \frac{1}{2} a)] + [(A_{sf} \cdot f_y) (d - \frac{1}{2} t_f)] \\
 &= [(13,152913 - 9,0543478) (414) (0,63 - \frac{0,237647929}{2})] \\
 &\quad + [(9,0543478) (414) (0,63 - \frac{0,175}{2})] \\
 &= 2900,927805 \text{ KN} \cdot \text{m}' \\
 0,8 M_{n,max} &= (0,8) (2900,927805) \\
 &= 2320,742244 \text{ KN} \cdot \text{m}'
 \end{aligned}$$

Karena $(0,8 M_{N,max} = 2320,742244 \text{ KN} \cdot \text{m}') > (M_{max} = 2248,0725 \text{ KN} \cdot \text{m}')$, maka tidak diperlukan baja tulangan tekan, yakni $A'_s = 0$

Kebutuhan luas baja tulangan yang diperlukan dalam mendisain balok T yang mengacu pada "disain usulan" ini adalah:

$$A_s = A_{s,max} = 13.152,913 \text{ mm}^2$$

Daktilitas diukur dengan nilai $\epsilon_{su,R} = 0,00376$.

Ratio penulangan aktual adalah:

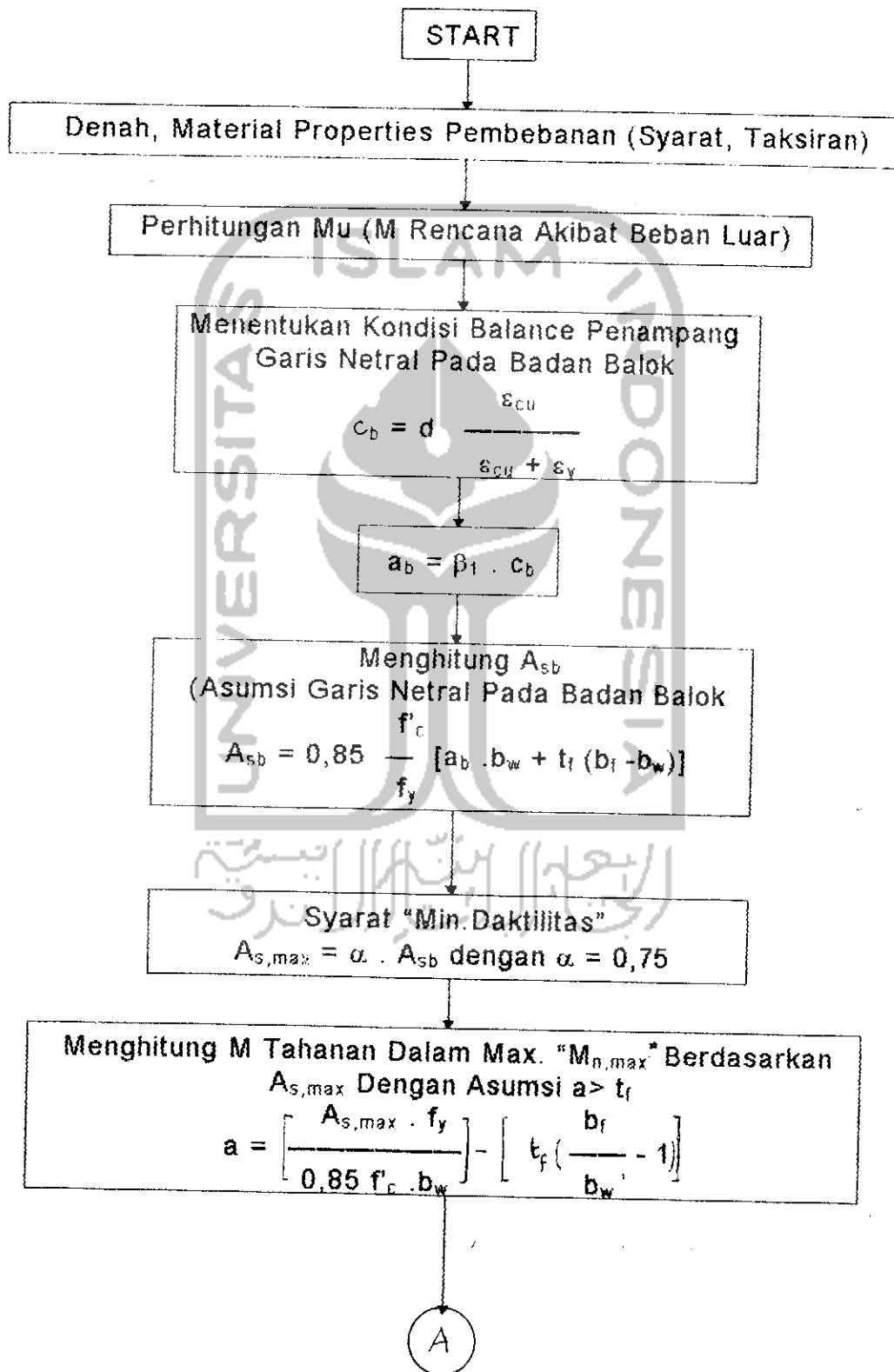
$$\begin{aligned}\rho_{\text{ aktual}} &= \frac{A_{s,\text{max}}}{b_f \cdot d} \\ &= \frac{13.152,913}{1200 \cdot 630} \\ &= 0,01739708\end{aligned}$$

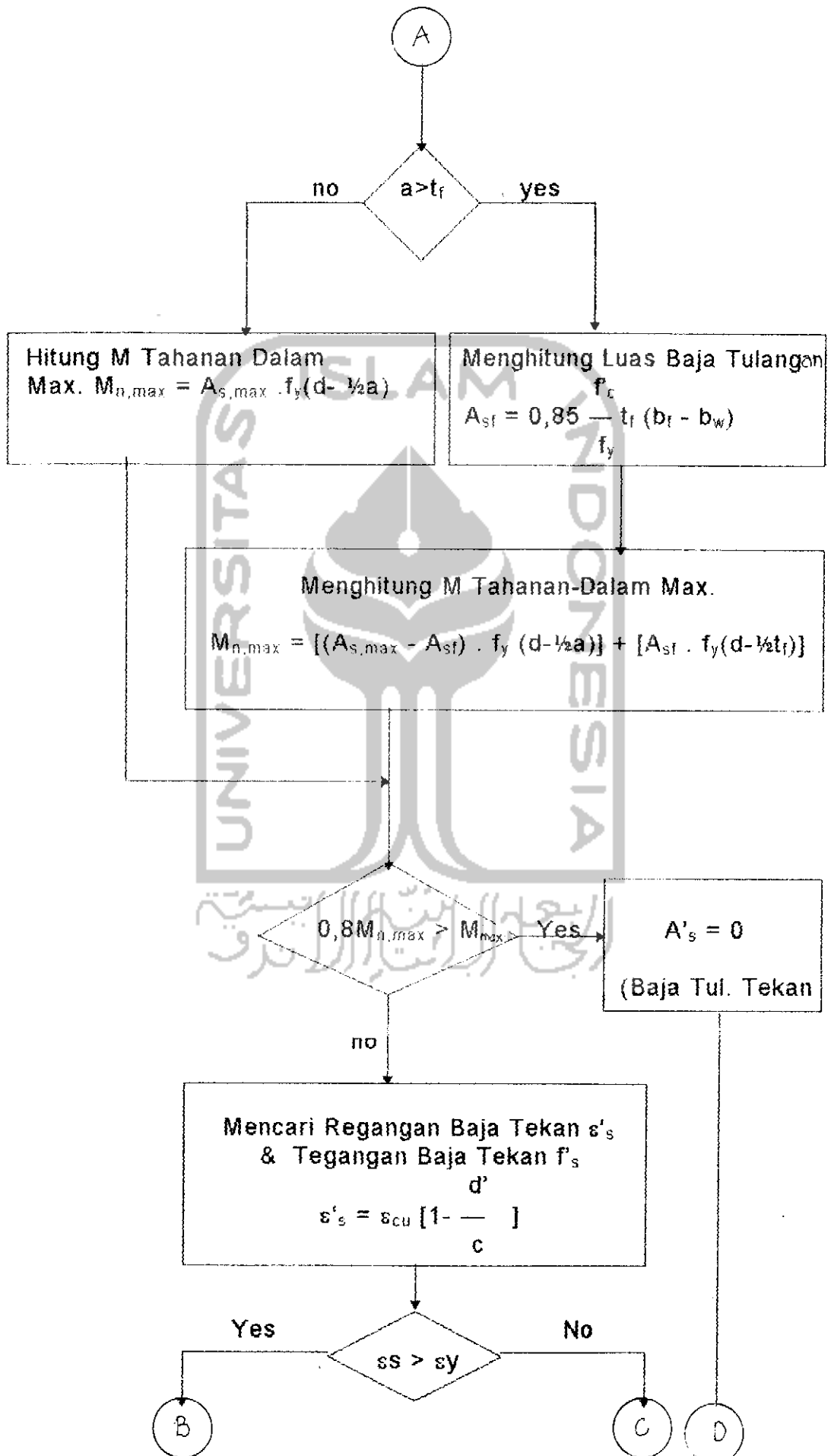
Karena kondisi yang membentuk tampang balok berupa tampang T murni, maka ratio penulangan maximum (ρ_{max}) dihitung sebagai berikut :

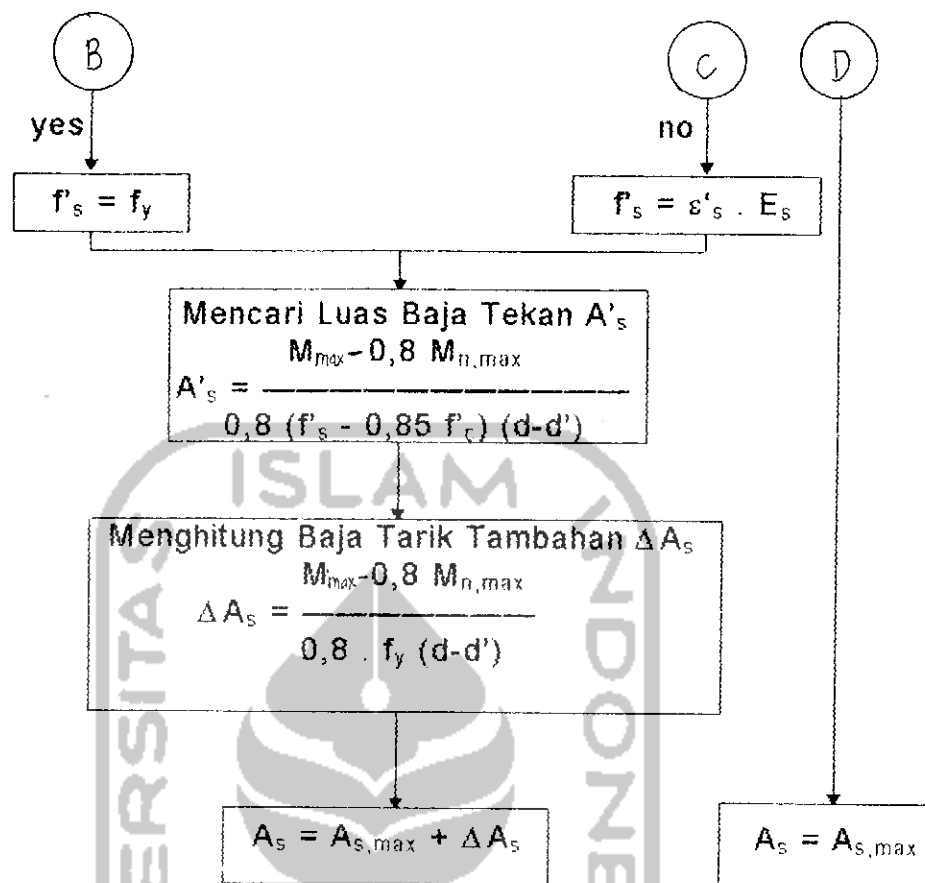
$$\begin{aligned}\rho_{\text{ usulan, max}} &= 0,85 \frac{f'_c}{f_y} \left[0,85 \left(\frac{1}{(b_f/b_w)} \right) \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_y} \right) + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{t_f}{d} \right) \left(1 - \frac{1}{(b_f/b_w)} \right) \right] \\ &= (0,85) \left(\frac{28}{414} \right) \left[(0,85) \left(\frac{300}{1200} \right) \left(\frac{0,003}{0,00676} \right) + \left(\frac{175}{630} \right) \right. \\ &\quad \left. \left(1 - \left(\frac{300}{1200} \right) \right) \right] \\ &= 0,01739803\end{aligned}$$

Untuk memudahkan perhitungan disain balok T, penulis menyajikan dua model pendisainan dalam bentuk bagan alir sebagai berikut:

Gambar 4.7
Bagan Alir Disain Tulangan Mengacu pada SK SNI/ACI



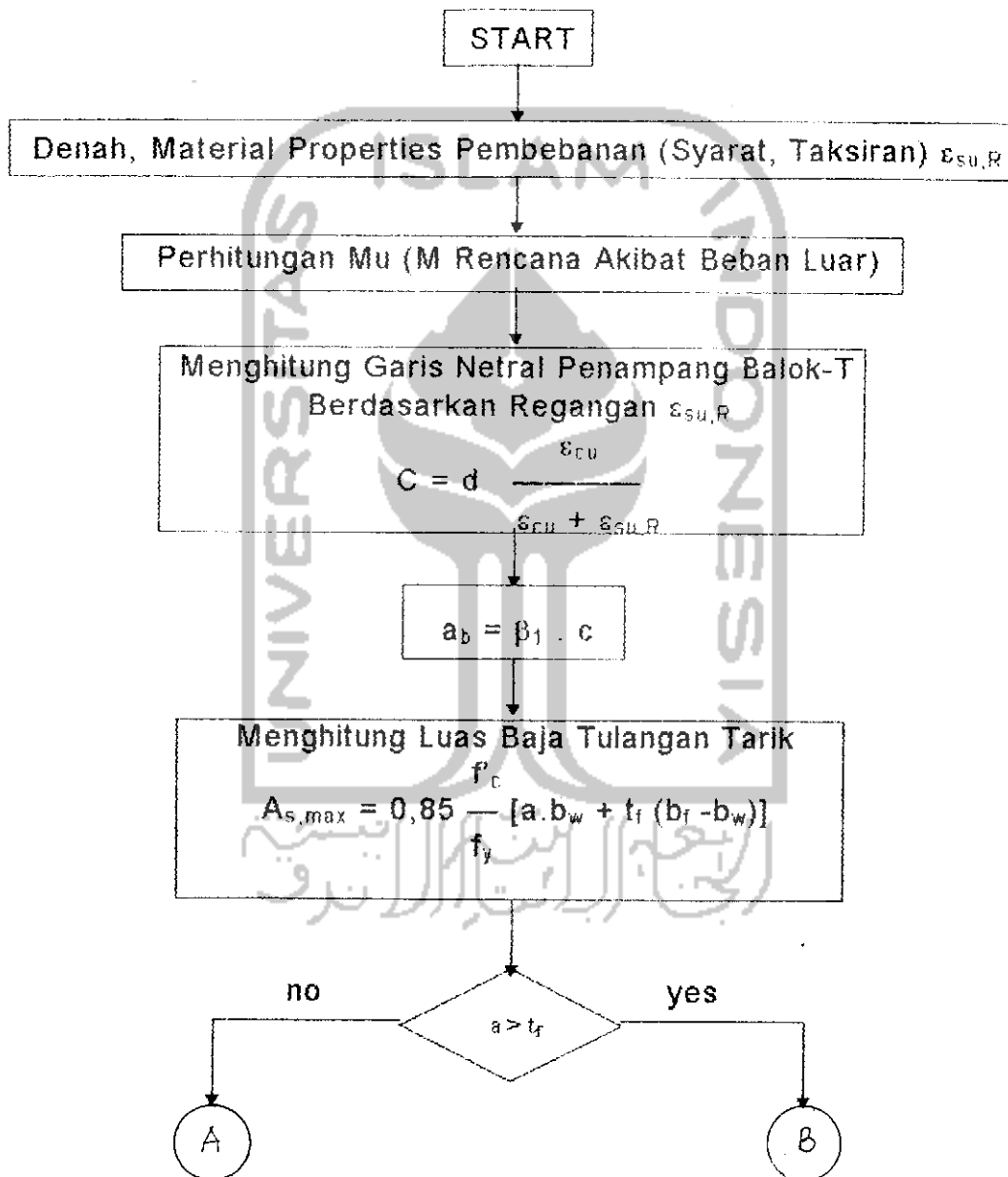


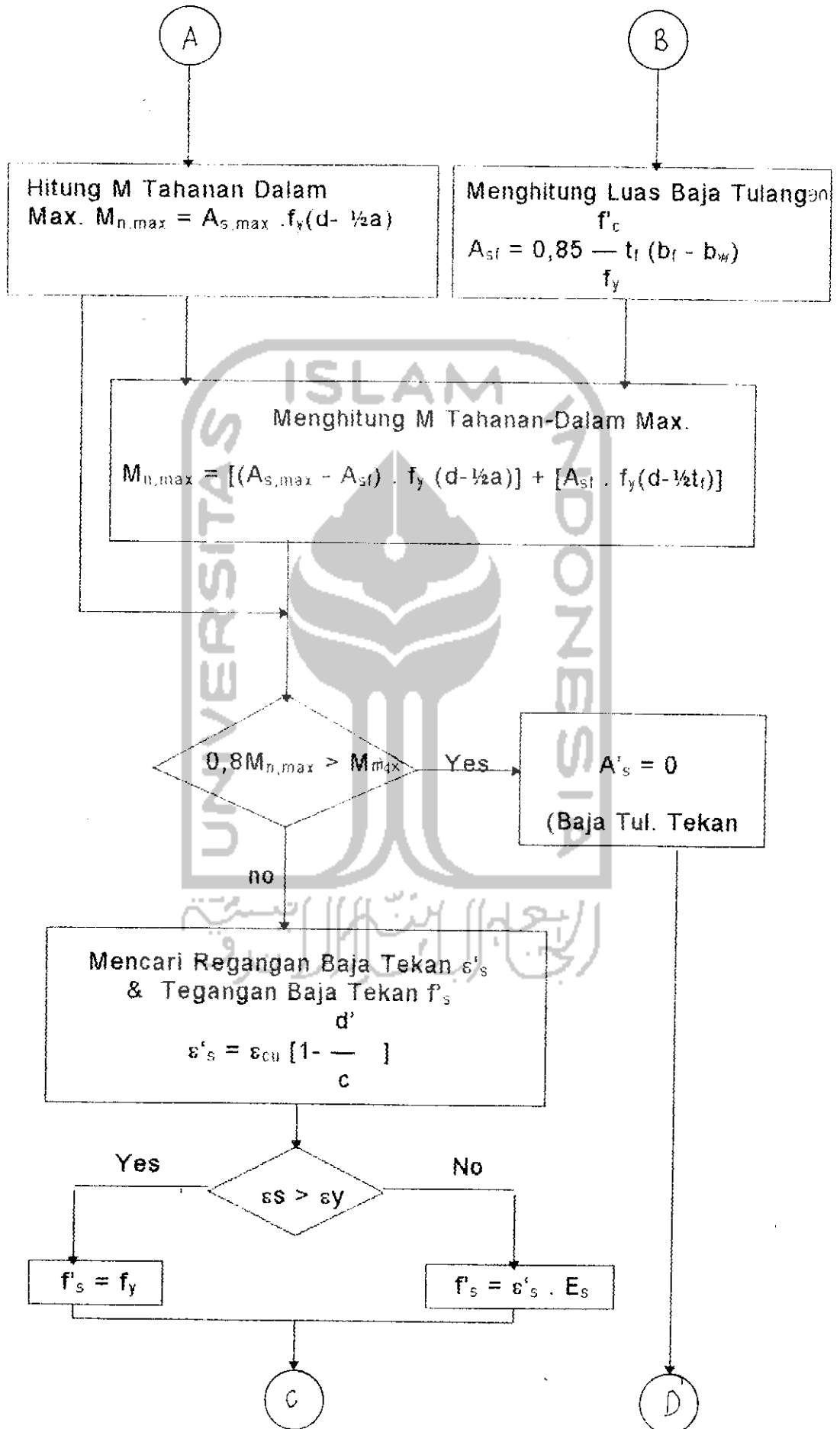


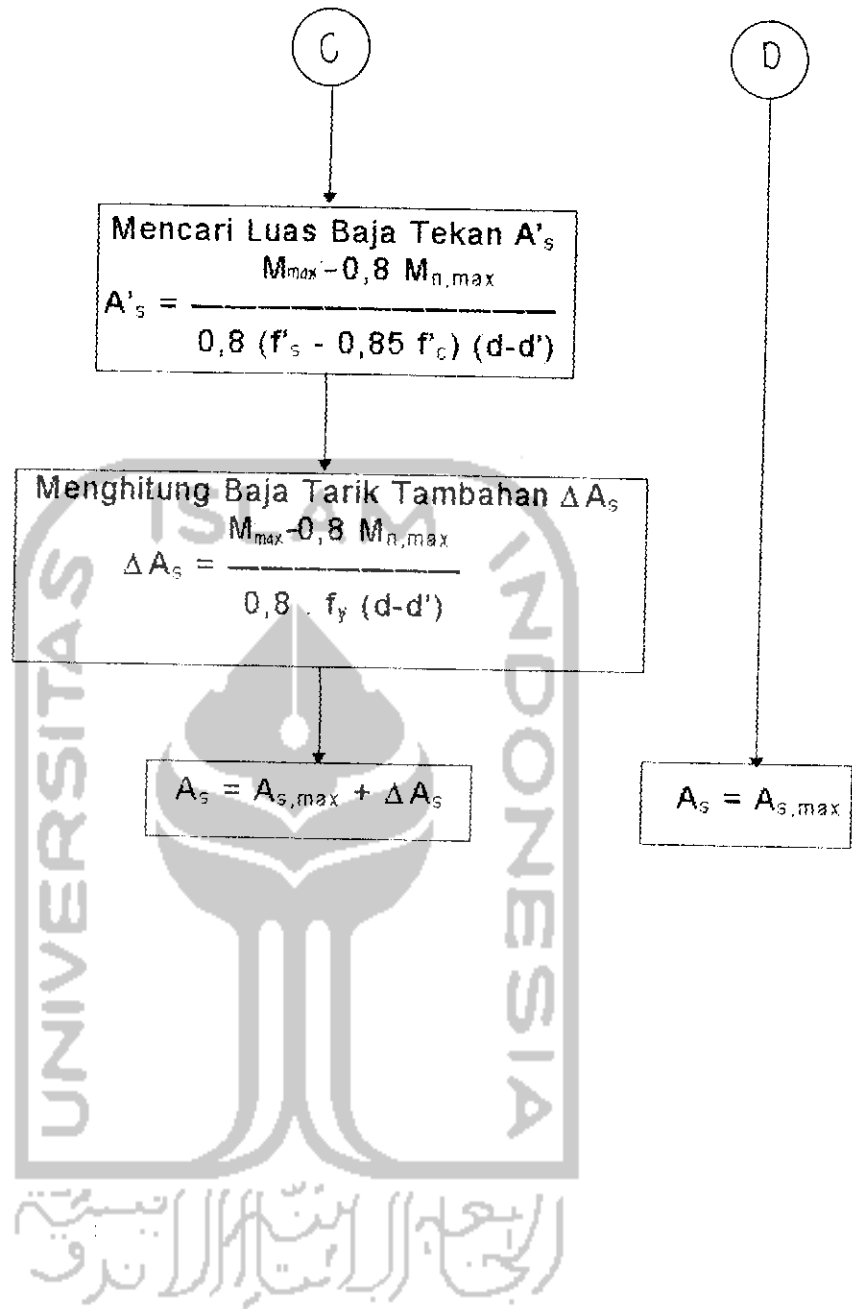
Gambar 4.8

Bagan Alir Disain Tulangan Usulan

$$(\epsilon_{su,T} = \epsilon_{su,R})$$







BAB V

PEMBAHASAN

Konsep disain usulan menggunakan harga $\varepsilon_{su,R}$ sebagai batas daktilitas pada balok tampang T merupakan suatu usaha untuk membuat balok menjadi lebih gatas pada batas-batas tertentu. Perhitungan disain tulangan balok T pada bab IV menunjukkan bahwa pada disain usulan membutuhkan luas baja tulangan yang sedikit dibandingkan dengan disain yang mengacu pada SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE.

Kedua disain tersebut mempergunakan tampang, spesifikasi material dan M_{max} (atau M akibat beban luar) yang sama.

Balok tampang T yang didisain mengacu pada SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE pada umumnya akan menghasilkan balok T bertulangan rangkap. Di dalam penulisan tugas akhir ini, balok T yang didisain mengacu pada kedua standar tersebut di atas memerlukan baja tulangan tekan kurang lebih 13% dari baja tulangan tariknya.

Sedangkan pada disain usulan ($\varepsilon_{su,T} = \varepsilon_{su,R}$) pada umumnya akan menghasilkan balok T bertulangan sebelah, yakni penampang balok tidak memerlukan baja tulangan tekan ($A'_s = 0$).

Hasil perhitungan kedua disain tersebut dapat dipertimbangkan dengan lebih rinci tabel berikut ini :

Tabel 5.1.

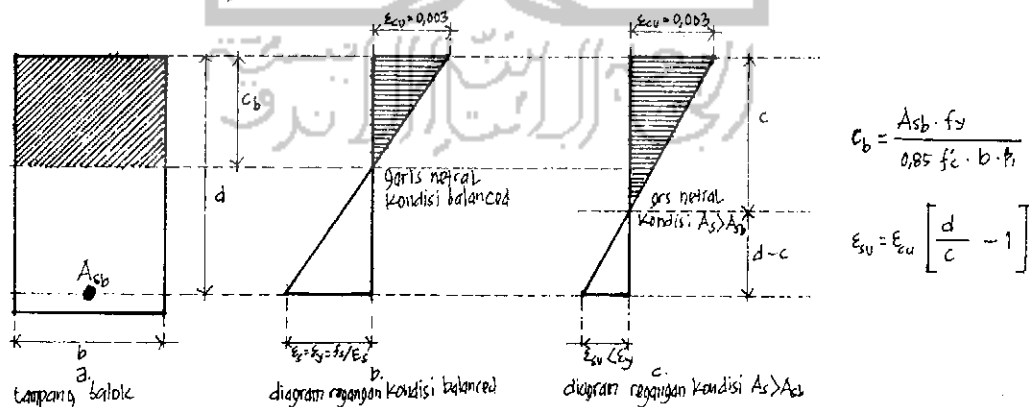
Notasi	Disain ACI Building CODE dan SK SNI T-15-1991-03	Disain usulan ($\delta_{su,T} = \delta_{su,R}$)
b_w (mm)	300	300
h (mm)	700	700
d (mm)	630	630
d' (mm)	70	70
t_l (mm)	175	175
b_f (mm)	1200	1200
a_b (mm)	316,8639	-
$A_{s,max}$ (mm ²)	10.889,3266	13.152,913
a (mm ²)	157,8495	237,6479
A_{sf} (mm ²)	-	9054,3478
A_w (mm ²)	-	4098,5652
ΔA_s (mm ²)	1405,036	0
A'_s (mm ²)	1661,79	0
$A_{s,tot}$ (mm ²)	13.956,1526	13.152,193
ϕ	0,8	0,8
M_{max} (KN.m')	2248,0725	2248,0725
$M_{r,max}$ (KN.m')	2484,347089	2900,927805
$\phi M_{n,max}$ (KN.m')	1987,477671	2320,742244
δ_{su}	0,007177416	0,00376
ρ_{min}	0,003381643	0,003381643
ρ	0,016262384	0,01739708
ρ_{max}	0,028914043	0,01739803

Dari definisi balok bertulang seimbang pada sub bab 3.2 dapat disimpulkan bahwa, semakin besar luas baja tulangan tarik pada suatu tampang balok, maka akan semakin getas tampang tersebut. Sebaliknya, semakin sedikit luas baja tulangan tarik, maka akan semakin liat tampang balok tersebut.

Tabel 5.1 di atas memperlihatkan bahwa luas baja tulangan tarik disain usulan ($A_s = A_{s,max} = 13.152,913 \text{ mm}^2$) lebih besar dari luas baja tulangan tarik disain yang mengacu pada SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE ($A_s = A_{s,max} + \Delta A_s = 12.229,6416 \text{ mm}^2$).

Senada dengan definisi di atas, maka disain usulan yang mempunyai luas baja tulangan tarik relatif lebih besar menghasilkan tampang yang lebih getas.

Ditinjau dari regangan baja tulangan tarik yang terjadi, semakin kecil nilai regangan baja tulangan tarik (ϵ_s) akan semakin getas tampang balok tersebut. Hal ini analogi dengan uraian balok bertulangan lebih ("Overreinforced") di bawah ini.



Gambar 5.1. Diagram regangan kondisi regangan seimbang (balanced) dan kondisi $A_s > A_{sb}$

Dari gambar 5.1. dapat diuraikan bahwa, apabila luas baja tulangan tarik (A_s) lebih besar dari A_{sb} maka akan menyebabkan harga c semakin besar. Sehingga nilai regangan baja tulangan tarik yang terjadi (ϵ_{su}) akan semakin mengecil atau tampang balok semakin getas.

Tabel 5.1. memperlihatkan ϵ_{su} disain usulan ($\epsilon_{su} = 0,00376$) lebih kecil dari ϵ_{su} disain ACI Building CODE & SK SNI T-15-1991-03, maka disain usulan menghasilkan tampang yang lebih getas.

Ditinjau dari ratio penulangan yang terjadi (ρ_{aktual}), dapat diungkapkan bahwa disain yang mengacu pada ACI Building CODE dan SK SNI T-15-1991-03 lebih kecil dari ρ_{aktual} disain usulan ($\rho_{aktual} = 0,01739708$).

Semakin besar nilai ρ_{aktual} , akan menyebabkan luas A_s makin besar pula. Hal ini analogi dengan pernyataan di atas, bahwa semakin besar luas A_s pada suatu tampang akan semakin getas pula tampang balok tersebut.

Kebutuhan baja tulangan tampang balok tersebut, dari tabel 5.1. dapat dihitung, bahwa disain yang mengacu pada ACI Building CODE dan SK SNI T-15-1991-03 membutuhkan luas baja tulangan tekan (A'_s) sebanyak 1.661,79 mm² atau $\pm 13\%$ dari luas baja tulangan tariknya, yakni:

$$= \frac{1.661,79}{10.889,3266 + 1.405,036} \times 100$$

$$= 13,52 \%$$

Sedangkan pada disain usulan ($\epsilon_{su,T} = (\epsilon_{su,R})$), $A'_s = 0 \text{ mm}^2$

Kemudian, disain yang mengacu pada ACI Building CODE dan SK SNI T-15-1991-03 membutuhkan luas baja tulangan sebesar $\pm 6\%$ lebih banyak dibandingkan disain usulan, yakni:

$$= \frac{13.956,1526 - 152,913}{13.152,913} \times 100$$
$$= 6,1\%$$



BAB VI

SIMPULAN dan SARAN

6.1. Simpulan

Balok tampang T yang dikenakan momen relatif besar sebagai gelagar memanjang, berdasarkan uraian pada bab IV dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Tampang yang didisain dengan mengacu pada disain usulan ($\epsilon_{su,T} = \epsilon_{su,R}$) akan memperkecil kebutuhan baja tulangan,
2. Lendutan balok tampang T sebagai gelagar memanjang hasil perhitungan disain usulan akan semakin kecil (balok lebih kaku dengan batas-batas keamanan yang dibenarkan),
3. Karena tidak menggunakan baja tulangan tekan, maka penulangan pada tampang yang didisain dengan disain usulan relatif lebih mudah dibandingkan dengan tampang yang didisain dengan mengacu pada SK SNI T-15-1991-03 dan ACI Building CODE.

6.2. Saran-Saran

1. Perhitungan tulangan yang mengacu pada disain usulan ($\epsilon_{su,T} = \epsilon_{su,R}$) akan lebih menguntungkan dalam segi kebutuhan baja tulangan.

2. Mengingat adanya batasan-batasan masalah, maka perencanaan balok tampang T yang ditumpu sederhana ini perlu dikembangkan pada balok menerus.



DAFTAR PUSTAKA

1. **ACI Structural Journal, A Journal of The American Concrete Institute**, Vol. 93 No. 1, January-February 1996.
2. Dipohusodo, Istimawan, 1994, **Struktur Beton Bertulang, Berdasarkan SK SNI T-13-1991-03**, DPU RI, Penerbit PT Gramedia Pusaka Utama, Jakarta.
3. Wang, Chu-Kia dan Salmon, C.G, 1993, **Disain Beton Bertulang Jilid I**, Penerbit Erlangga, Jakarta.
4. Kusuma, Gideon dan Vis, W.C, 1993, **Dasar-Dasar Perencanaan Beton Bertulang, Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03**, Penerbit Erlangga, Jakarta.
5. Nawy, Edward G, 1990, **Beton Bertulang, Suatu Pendekatan Dasar**, Penerbit PT Eresco, Bandung.
6. Ferguson, Phil M, 1986, **Dasar-Dasar Beton Bertulang, Versi SI**, Penerbit Erlangga, Jakarta.
7. **Building CODE Requirements For Reinforced Concrete, ACI 318-89.**
8. **Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung, SK SNI T-15-1991-03**, Departemen Pekerjaan Umum, Penerbit Yayasan LPMB, Bandung.
9. **Pedoman Perencanaan Pembebanan Jembatan Jalan Raya**, Departemen Pekerjaan Umum, Penerbit Yayasan Badan Penerbit PU.

LAMPIRAN



NOTASI

- a' = tinggi blok tegangan tekan ekivalen, mm
- a_b = tinggi blok tegangan tekan ekivalen kondisi keseimbangan regangan, mm
- b = lebar daerah tekan balok empat persegi panjang, mm
- b_f = lebar sayap (flens) efektif balok tampang T, mm
- b_w = lebar badan balok tampang T, mm
- c = Jarak dari serat tekan terluar kegaris netral, mm
- c_b = Jarak dari serat tekan terluar kegaris netral kondisi keseimbangan regangan, mm
- d = Jarak dari serat tepi terluar ke pusat tulangan tarik, mm
- d' = Jarak dari serat tepi terluar ke pusat tulangan tekan, mm
- f'_c = Tegangan tekan beton yang disyaratkan, MPa
- f'_s = Tegangan tekan baja tulangan yang disyaratkan, MPa
- f_y = Tegangan luluh baja tulangan yang disyaratkan, MPa
- h = tinggi total balok, mm
- q = beban terbagi merata
- q_d = beban mati terbagi merata
- q_L = beban hidup terbagi merata
- q' = beban terbagi merata terdistribusi
- q'_L = beban hidup terbagi merata terdistribusi
- q_{du} = beban mati terbagi merata berfaktor

- q'_{LU} = beban hidup terbagi merata berfaktor
 q_{total} = $q_{du} + q_{LU}$
 t_f = tebal sayap (flens) balok tampang T, mm
 A_s = luas baja tulangan, mm²
 A'_s = luas baja tulangan tekan, mm²
 A_{sb} = luas baja tulangan untuk kondisi keseimbangan regangan, mm²
 A_{sf} = luas baja tulangan tarik imbang beton tekan daerah flens, mm²
 A_{sw} = luas baja tulangan tarik imbang beton tekan daerah badan balok, mm²
 $A_{s, max}$ = luas maximum baja tulangan tarik, mm²
 $A_{s, total}$ = jumlah luas baja tulangan pada suatu tampang balok, mm²
 C = Gaya tekan tampang balok, kN
 C_f = Gaya tekan daerah sayap (flens) balok tampang T, kN
 C_w = Gaya tekan daerah badan balok tampang T, kN
 E_s = Modulus elastik baja tulangan, MPa
 K = faktor kejut seperti dalam definisi bab 4.2.1.
 L = Panjang bentang, m
 M_n = kuat momen nominal, kN.m
 M_{nb} = kuat momen nominal untuk kondisi keseimbangan regangan, kN.m'

- $M_{n,max}$ = kuat momen nominal maximum, kN.m'
 M_{max} = momen akibat beban luar berfaktor, kN.m'
 P = beban bergaris seperti dalam definisi bab 4.2.1.
 P' = beban bergaris terdistribusi
 P'_U = beban bergaris terdistribusi berfaktor
 R_A = reaksi perletakan joint A, ton
 R_B = reaksi perletakan joint B, ton
 S = jarak antar gelegar memanjang (as-as)
 T = kuat tarik tampang balok, kN
 Z = lengan kopel momen tahanan dalam, mm
 α = faktor reduksi, pembatas pola hancur daktail
 = 0,75
 Ω = faktor distribusi beban, seperti dalam definisi bab 4.2.1.
 β_1 = faktor yang merupakan fungsi dari kelas kuat beton, seperti dalam definisi bab 3.2.1.
 ΔA_s = luas baja tarik tambahan untuk menahan kelebihan momen maximum
 ϵ'_c = regangan tekan lentur beton
 ϵ_{cu} = regangan runtuh beton
 = 0,003
 ϵ_{su} = regangan yang terjadi dalam baja tulangan tarik
 ϵ'_s = regangan yang terjadi dalam baja tulangan tekan
 ϵ_y = regangan luluh baja

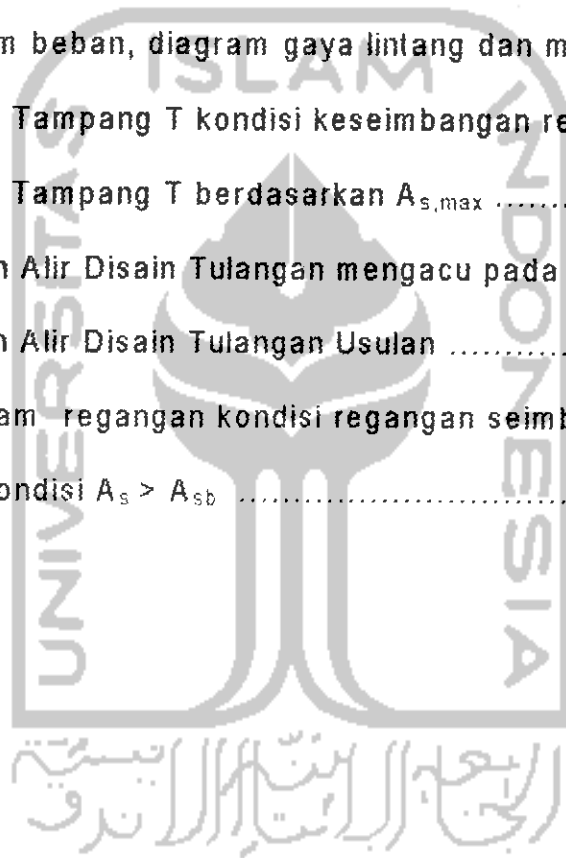
- $\epsilon_{su,min}$ = batas regangan minimum baja tarik
- $\epsilon_{su,R}$ = batas regangan minimum baja tarik untuk tampang empat persegi panjang
- $\epsilon_{su,T}$ = batas regangan minimum baja tarik untuk tampang T
- Φ_{II} = kelengkungan ultimit pada tampang
- $\Phi_{u,min}$ = kelengkungan minimum pada tampang
- Φ = faktor reduksi seperti dalam definisi bab 3.1.2.
- μ = ratio daktilitas
- ρ = ratio penulangan
- ρ_{max} = batas harga ratio penulangan maximum
- ρ_{min} = batas ratio penulangan minimum
- ρ_b = harga ratio penulangan kondisi keseimbangan
- ρ_{aktual} = ratio penulangan yang terjadi

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
الجامعة الإسلامية
الاندونيسية

DAFTAR GAMBAR

No	Nama Gambar	Halaman
2.1.	Penampang efektif balok T dalam suatu sistem lantai	11
2.2.	Perilaku lentur pada beban sedang	13
2.3.	Tegangan tekan benda uji	14
2.4.	Berbagai kuat tekan benda uji beton	14
2.5.	Distribusi regangan dan tegangan dekat beban ultimate	14
3.1.	Kondisi saat kekuatan lentur nominal M_n tercapai	19
3.2.	Parameter "padat tegangan" (diambil dari ACI Building CODE)	23
3.3.	Distribusi tegangan persegi ekuivalen dari Whitney	24
3.4.	Tampang balok dan diagram regangan - tegangan kondisi seimbang regangan atau kondisi balance	28
3.5.	Balok tampang empat persegi panjang pada kondisi kuat lentur maximal	31
3.6.	Balok Tampang T pada kondisi keseimbangan regangan..	35
3.7.	Balok Tampang T pada kondisi Kuat lentur max, $a \leq t_f$ untuk $A_s = A_{s,max}$	38
3.8.	Balok Tampang T murni pada kondisi kuat lentur max, $a \geq t_f$ untuk $A_s = A_{s,max}$	40
3.9.	Variasi ratio $(\epsilon_{su,T}/\epsilon_{cu,R})$, dengan (b_f/b_w) untuk beberapa nilai (t_f/d) dan mutu tulangan 60 (414 Mpa)	43
3.10.	Variasi ratio $(\epsilon_{su,T}/\epsilon_{su,R})$, dengan (b_f/b_w) untuk beberapa nilai (t_f/d) dan mutu baja tulangan 40	44
3.11.	Variasi nilai ρ_{max} (disain ACI) dengan (b_f/b_w) untuk beberapa harga t_f/d ; $f'_c = 28$ MPa; $f_y = 414$ Mpa; $\beta_1 = 0,85$; $\alpha = 0,75$; $\epsilon_{cu} = 0,003$; dan $\epsilon_y = 0,002069$	47

3.12.	Variasi nilai ρ_{max} (disain ACI) dengan (b_f/b_w) untuk beberapa harga t_f / d dimana $\epsilon_{su,T} = \epsilon_{su,R}$; $f'_c < 28$ Mpa; $\beta_1 = 0,85$; $\alpha = 0,75$; $\epsilon_{cu} = 0,003$; dan $\epsilon_y = 0,002069$	48
4.1.	Denah jembatan	51
4.2.	Gambar tampak samping	51
4.3.	Gambar rencana dimensi balok T	52
4.4.	Sistem beban, diagram gaya lintang dan momen	59
4.5.	Balok Tampang T kondisi keseimbangan regangan	62
4.6.	Balok Tampang T berdasarkan $A_{s,max}$	66
4.7.	Bagan Alir Disain Tulangan mengacu pada SK SNI/ACI....	73
4.8.	Bagan Alir Disain Tulangan Usulan	76
5.1.	Diagram regangan kondisi regangan seimbang (balance) dan kondisi $A_s > A_{sb}$	81





UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
JURUSAN TEKNIK SIPIL
Jl. Kaliurang Km. 14,4 Telp. 95330 Yogyakarta

KARTU PESERTA TUGAS AKHIR

No.	Nama	No. Mhs.	N.I.R.M.	Bidang Studi
1	RACHITO RIADI	87310048		STRUKTUR

Dosen Pembimbing I : Ir. H. SUGASTHAREN, MS
Dosen Pembimbing II : Ir. A. KADIR ADORIL, MS

1

2

Yogyakarta, 18 Juli 1997

Dekan,

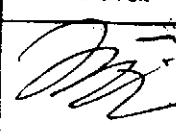




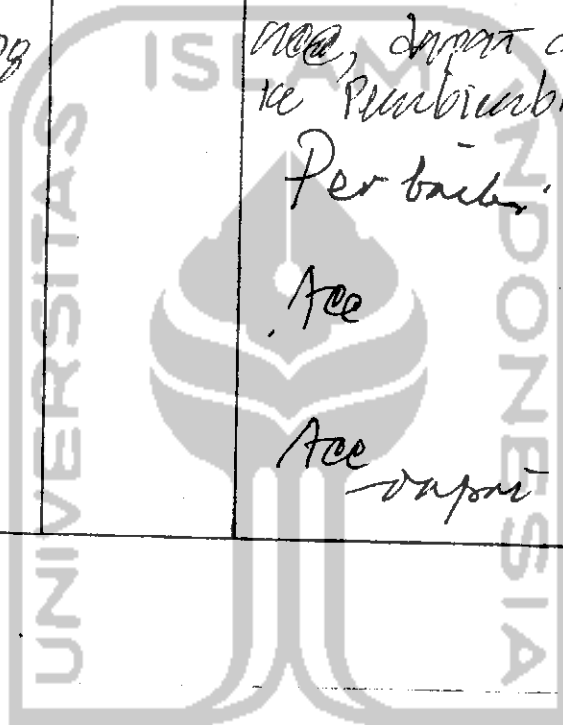
3 x 4



الجامعة الإسلامية
التي تلتزم بالالتزام

CATATAN - KONSULTASI

No.	Tanggal	Konsultasi ke:	KETERANGAN	Paraf
1	10/12/97	I	- Perbaikan - tembakau	
2	27/05/97		- Noms puspawajaya Waktu T.A - Perbaikan	
3	4/06/98		mem, dapat dirampatkan ke Pamburing I	
4	16/6/98		Perbaikan	Sus
5	17/6/98		Ace	Sus
6	25/7/98		Ace - vapor di jilid	Sus



الجامعة الإسلامية
الاندونيسية