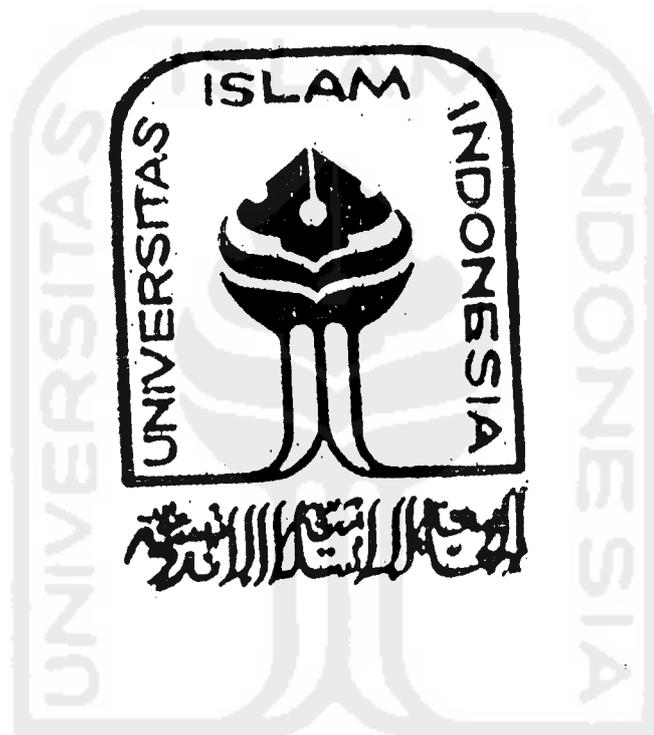


**TUGAS AKHIR**  
**ANALISIS BALOK KOMPOSIT DENGAN**  
**" WEB OPENINGS "**



Disusun Oleh :

**MUHAMMAD NURDIN SYAFETI**

85 310 094

**ANI SOFIAN**

84 310 329

**JURUSAN TEKNIK SIPIL**  
**FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN**  
**UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**  
**YOGYAKARTA**  
**1 9 9 6**

LEMBAR PENGESAHAN

**TUGAS AKHIR**

ANALISIS BALOK KOMPOSIT DENGAN  
" WEB OPENINGS "

Disusun Oleh :

**MUHAMMAD NURDIN SYAFE'I**  
85 310 094

**ANI SOFIAN**  
84 310 329

Diperiksa dan Disetujui oleh

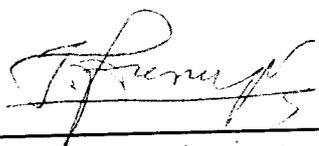
Tim Pembimbing

Tanda Tangan

Ir. M. Teguh, MSCE.  
Dosen Pembimbing I

\_\_\_\_\_  
Tanggal :

Ir. H. Harsoyo, MSC.  
Dosen Pembimbing II

  
\_\_\_\_\_  
Tanggal : 27/8/96

## PRAKATA

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah. puji syukur dipanjatkan kehadiran Allah SWT. atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga dapat terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi kurikulum jenjang Strata Satu pada Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dengan selesainya Tugas Akhir ini diucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Susastrawan, MS. selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.
2. Bapak Ir. Bambang Sulistiono, MSCE. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.
3. Bapak Ir. Mochammad Teguh, MSCE. selaku Dosen Pembimbing I.
4. Bapak Ir. H. Harsoyo, MSC. selaku Dosen Pembimbing II.
5. Seluruh Staf dan Karyawan Civitas Akademika Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.
6. Semua pihak yang telah membantu atas terselesaikannya

Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu

persatu.

Menyadari keterbatasan Pengetahuan yang dimiliki, dengan kerendahan hati disadari Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu kritik dan saran yang membangun diharapkan demi kemajuan kita bersama.

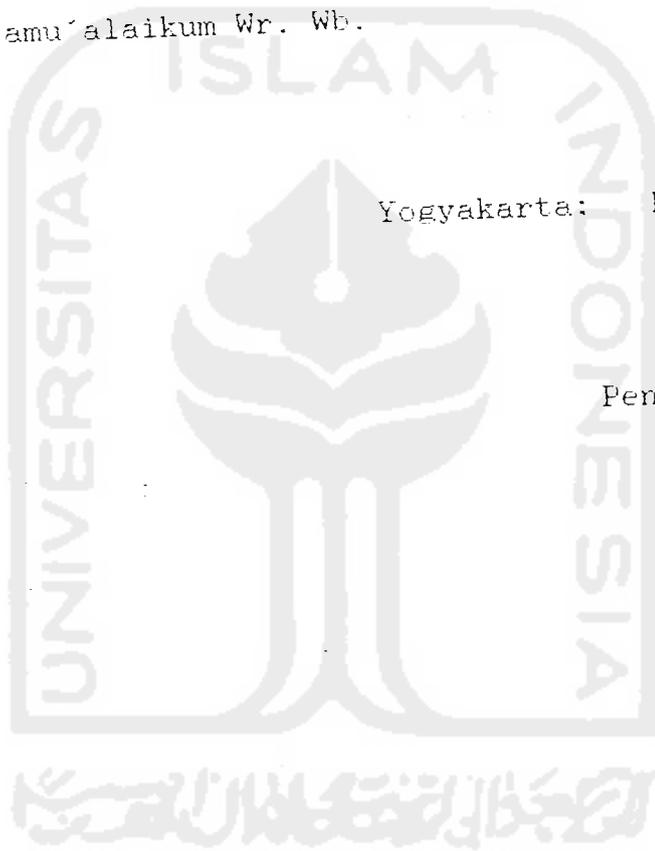
Akhir kata semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi mereka yang membutuhkan.

Billahitaufik wal hidayah

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta: Pebruari 1996

Penulis



## DAFTAR ISI

	halaman
PRAKATA .....	i
DAFTAR ISI .....	iii
DAFTAR GAMBAR .....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR NOTASI .....	ix
ABSTRAKSI .....	xii
BAB I. PENDAHULUAN .....	1
I.1 Latar belakang masalah .....	1
I.2 Tujuan .....	3
I.3 Batasan masalah .....	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA .....	5
II.1 Sifat-sifat baja struktur .....	5
II.2 Perencanaan berdasarkan kekuatan batas .....	7
II.2.1 Momen plastis pada penampang .....	8
II.2.2 Faktor beban .....	9
II.3 Konstruksi balok komposit .....	10
II.3.1 Pengertian konstruksi balok komposit .....	10
II.3.2 Proses kerja komposit .....	10
II.4 Alat penghubung geser .....	13
II.5 Balok komposit dengan <i>web openings</i> .....	19
II.5.1 Dasar-dasar penelitian <i>Clawson</i> dan <i>Darwin</i> .....	19

II.5.2	Perencanaan balok <i>Clawson</i> dan <i>Darwin</i> .....	20
II.5.3	Retak yang terjadi pada beton dalam percobaan <i>Clawson</i> dan <i>Darwin</i> .....	23
II.5.4	Kegagalan ( <i>failure</i> ) pada percobaan <i>Clawson</i> dan <i>Darwin</i> .....	25
II.5.5	Detail dan sifat-sifat balok .....	28
BAB III	ANALISIS BALOK KOMPOSIT DENGAN <i>WEB OPENINGS</i> .....	30
III.1	Pendahuluan mengenai aksi komposit .....	30
III.2	Pengaruh-pengaruh penggunaan <i>web openings</i> .....	34
III.3	Teori balok dengan <i>web openings</i> dan momen lentur .....	36
III.4	Perencanaan yang disederhanakan .....	44
III.5	Batas-batas gaya geser pada lubang .....	49
III.6	Penerapan pendekatan diagram interaksi ...	50
BAB IV.	PEMBAHASAN .....	53
IV.1	Aplikasi .....	53
IV.1.1	Perhitungan balok komposit dengan <i>web openings</i> dengan menggunakan pengaku .....	57
IV.1.2	Perhitungan balok komposit dengan <i>web openings</i> tanpa pengaku .....	65
IV.1.3	Perhitungan balok komposit konvensional .....	69
IV.2	Kesimpulan perhitungan .....	72

BAB V.	KESIMPULAN DAN SARAN .....	75
V.1	Kesimpulan .....	75
V.2	Saran .....	75
DAFTAR PUSTAKA .....		77
LAMPIRAN - LAMPIRAN .....		79



## DAFTAR GAMBAR

Gambar	halaman
1.1a Pola pemotongan balok .....	3
1.1b Balok setelah di las .....	3
2.1 Diagram tegangan-regangan baja struktur .....	5
2.2 Distribusi Tegangan pada tiap tahap pembebanan .....	7
2.3a Penampang segi empat dan gaya-gaya .....	8
2.3b Penampang I dan gaya-gaya .....	9
2.4 Berbagai tipe penampang komposit .....	11
2.5 Perbandingan lendutan dengan dan tanpa kerja komposit .....	12
2.6 Distribusi tegangan .....	12
2.7 Alat penghubung geser .....	14
2.8 Tipe penghubung geser/ <i>shear connectors</i> .....	15
2.9 Hubungan antara slip-beban .....	16
2.10 Balok komposit dengan <i>web openings</i> .....	20
2.11 Lokasi lubang, konfigurasi beban dan panjang bentangan .....	21
2.12 Lokasi <i>headed stud</i> .....	22
2.13 Penulangan pelat beton .....	23
2.14a Kegagalan balok no.3 .....	24
2.14b Kegagalan balok no.4 .....	24
2.15 Diagram interaksi momen-geser balok-balok percobaan .....	28
3.1 Penampang balok komposit .....	30
3.2 Distribusi tegangan pada kekuatan batas .....	33

3.3	Mekanisme runtuh <i>web openings</i> dengan pengaku.....	35
3.4	Penampang balok komposit dengan <i>web openings</i> menggunakan pengaku .....	36
3.5	Gaya-gaya yang bekerja pada tepi lubang .....	38
3.6	Momen <i>Vierendeel</i> ultimit .....	39
3.7a	Diagram interaksi dengan $A_r/A_f = 1,0$ .....	45
3.7b	Diagram interaksi dengan $A_r/A_f = 0,5$ .....	46
3.8	Pengaruh rasio $A_r/A_f$ .....	47
4.1	Pembebanan balok komposit dengan <i>web openings</i> .....	54
4.2	Momen dan gaya lintang .....	56
4.3	Tampang balok komposit dengan <i>web openings</i> dengan menggunakan pengaku .....	56
4.4	Tampang melintang profil $W12 \times 26$ .....	62
4.5	Tampang balok komposit dengan <i>web openings</i> tanpa pengaku .....	68
4.6	Tampang balok komposit dan gaya-gaya .....	70

## DAFTAR TABEL

Tabel	halaman
2.1a	Beban geser horizontal yang diizinkan untuk satu alat penghubung (dari <i>AISC-1.11.4</i> ) .....18
2.1b	Faktor reduksi untuk kapasitas alat penghubung pada beton dengan agregat yang berbobot ringan.....18
2.2	Hasil percobaan balok komposit dengan <i>web openings</i> dengan beban tertentu .....26
4.1	Hasil perhitungan balok komposit .....72



## DAFTAR NOTASI

$A_s$	= luas netto penampang baja
$A_c$	= luas efektif beton
$A_f$	= luas sayap ( <i>flens</i> )
$A_r$	= luas pengaku
$A_t$	= luas <i>stem profil Tee</i>
$\alpha$	= angka eksponen
$b$	= lebar efektif beton
$b_f$	= lebar sayap ( <i>flens</i> )
$b_r$	= lebar pengaku
$C$	= gaya tekan pada beton
$C'$	= gaya tekan pada baja
$F = F_c$	= gaya
$F_t$	= gaya tarik pada baja
$F_y = \sigma_y$	= tegangan leleh baja
$f$	= faktor keamanan
$f'_c$	= kekuatan tekan beton
$H$	= setengah tinggi lubang
$h$	= tinggi total baja
$h_c$	= tebal beton efektif
$h_f$	= tebal beton
$I_{eff}$	= momen inersia efektif
$I_s$	= momen inersia baja
$I_{tr}$	= momen inersia komposit
$k_1$	= fraksi leleh pada sayap ( <i>flens</i> )
$k_2$	= fraksi leleh pada badan ( <i>web</i> ) dan pengaku

$k_z$	= luas leleh pengaku dan badan ( <i>web</i> ) pada lubang
$l$	= setengah panjang lubang
$M_c$	= momen beton
$M_{cc} = M_{comp}$	= kapasitas momen penampang komposit penuh
$M_{co}$	= kapasitas momen komposit penuh dengan gaya geser nol
$M_p$	= momen plastis
$M_S = M_T$	= momen batas penampang baja
$M_{sc}$	= kapasitas momen batas penampang baja pada lubang
$M_{so}$	= kapasitas momen penampang baja dengan $V = 0$
$M_t$	= kapasitas momen batas penampang pada lubang
$M_{to}$	= kapasitas momen komposit total pada keadaan gaya geser dengan $V = 0$
$M_{tc}$	= kapasitas momen komposit total pada keadaan batas
$M_{tu}$	= kapasitas momen komposit total pada keadaan batas
$M_v$	= momen akibat gaya geser ( <i>vierendeel</i> )
$M_y$	= momen leleh
$S_{eff}$	= modulus penampang efektif
$S_s$	= modulus penampang komposit
$S_{tr}$	= modulus transformasi penampang komposit
$s$	= tinggi badan ( <i>web</i> ) pada profil tee ( <i>web stem</i> )
$T$	= gaya tarik baja
$T_B$	= gaya tarik baja profil tee bagian bawah
$T_T$	= gaya tarik baja profil tee bagian atas
$t_f$	= tebal sayap ( <i>flens</i> )

$t_r$	= tebal pengaku
$t_w$	= tebal badan penampang
$V$	= gaya geser total pada penampang
$V_h$	= gaya geser horizontal pada aksi komposit penuh
$V'_h$	= kapasitas alat penghubung yang dipakai pada aksi komposit
$V_m$	= gaya geser maksimum
$V_p$	= gaya geser plastis
$V_c$	= gaya geser runtuh
$\bar{y}$	= jarak dari gaya tarik baja ke garis tengah penampang baja
$\sigma_y$	= tegangan leleh
$\sigma_w$	= tegangan normal pada badan ( <i>web</i> )
$\sigma_{yf}$	= tegangan leleh baja pada pada sayap ( <i>flens</i> )
$\sigma_{yr}$	= tegangan leleh baja pada pengaku
$Z$	= modulus penampang plastis
$z$	= jarak/lengan gaya antara gaya tekan beton dan gaya tarik baja
$\tau$	= tegangan geser

## ABSTRAKSI

Semakin banyaknya bangunan-bangunan gedung menggunakan konstruksi baja, maka pemakaian balok komposit dengan *Web Openings* merupakan salah satu pilihan yang tepat karena akan menambah kekuatan dan kekakuan. Disamping itu masih banyak keuntungan dari berbagai aspek lainnya.

Pada perencanaan balok komposit dengan *web openings* distribusi tegangan yang terjadi harus merupakan suatu pelat yang memadai, sehingga kedua material (baja dan beton) dapat memikul gaya-gaya yang bekerja sesuai dengan sifat-sifat kekuatannya.

Untuk menghindari tekuk elastis atau non elastis disebabkan adanya lubang pada badan, maka digunakan pengaku-pengaku berbentuk flens pada badan tersebut, sehingga struktur balok komposit dengan *web openings* akan lebih kuat dan aman.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang Masalah

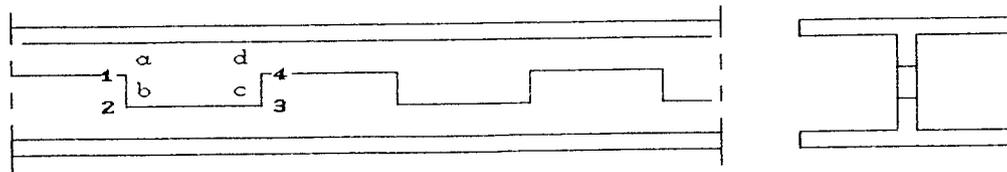
Balok baja dan pelat beton bertulang yang dicor di tempat biasanya direncanakan dengan anggapan bahwa pelat beton dan baja bekerja secara terpisah dalam menahan beban. Pengabaian ini didasarkan pada alasan bahwa lekatan (*bond*) antara pelat beton dan puncak balok baja tidak dapat diandalkan. Namun, dengan berkembangnya teknik pengelasan, pemakaian *shear connector* menjadi praktis untuk menahan gaya geser horisontal yang timbul ketika batang terlentur.

Dalam perkembangan yang lebih maju, balok komposit dengan profil bagian badan yang berlubang/terbuka (*web openings*) sudah umum dipakai sebagai bagian yang menerima beban pada bangunan-bangunan yang bertingkat tinggi dan telah mendapat kepercayaan dari para ahli. Para ahli telah melakukan analisis dan penelitian untuk mempelajari balok baja dengan *web openings*. Seperti diketahui pada saat sekarang ini banyak bangunan yang memakai konstruksi baja, jika ditinjau dari aspek struktur konstruksi, ini merupakan salah satu usaha untuk menambah kekuatan dan kekakuan profil baja terhadap pengaruh lentur, dan menghasilkan balok yang lebih tinggi. Dalam perencanaan

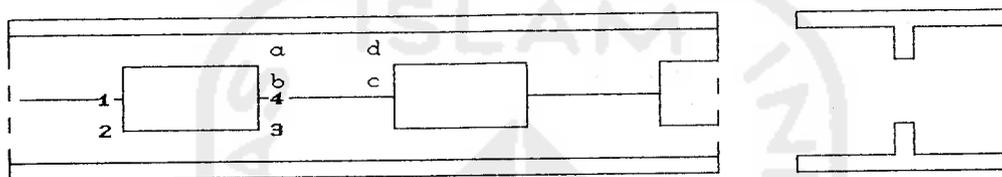
gedung, pabrik dan bangunan-bangunan lainnya, *web openings* ini dapat digunakan sebagai ruang untuk melewati pipa-pipa listrik, *Air Conditioning* dan lain-lain. Bentuk lubang dapat bervariasi segi empat atau segi enam.

Analisis balok komposit dengan *web openings* telah banyak dibicarakan oleh para ahli antara lain : *Todd* dan *Cooper*, *Donoghue* dan *Wong*, serta *Darwin* dan *Clawson*. Kedua ahli yang terakhir ini telah melakukan percobaan terhadap balok di atas, hasil percobaannya dapat digunakan sebagai pedoman perencanaan yang disarankan untuk balok komposit dengan *web openings*.

Profil balok baja dengan *web openings* adalah balok baja yang dipotong pada bagian badannya dengan pola yang teratur menjadi dua bagian yang simetris dalam arah memanjang sepanjang bentangan balok, sehingga terdapat dua bagian yang sama dan sebangun. Kemudian salah satu bagian di geser agar bertemu dua potongan yang posisi semula berbeda hingga akan membentuk lubang-lubang. Untuk menggabung kembali potongan-potongan tersebut, maka potongan tersebut di las. Jenis las yang dipakai adalah las *groove* dengan tujuan agar sekurang-kurangnya memiliki kekuatan yang sama dengan kekuatan batang yang disambung (Gambar 1.1). Profil yang dipakai biasanya dibentuk dari profil-I atau profil kanal. Gagasan ini untuk pertama kali dikemukakan oleh *H.E. Horton* dari *Chicago and Iron Works*, sekitar tahun 1910.



Gambar 1.1a. Pola pemotongan



Gambar 1.1b. Balok setelah di las

Analisis yang di bahas disini adalah pengembangan dari analisis yang dilakukan *Mc Cormick*, yang membahas tentang balok non komposit yang berlubang sepusat dengan perkuatan dan balok-balok komposit *web openings* yang sepusat tanpa perkuatan dengan dimensi dan sifat-sifat tertentu. Pengembangan disini hanya dalam bentuk dari balok secara umum dan bentuk *web openings* yang ditinjau merupakan segi empat dengan tinggi, lebar dan letak lubangnya mengikuti pola potongan yang teratur.

## I.2 Tujuan

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk menganalisis balok komposit dengan *web openings* yang meliputi jenis kegagalannya (*failure*) yang didasari dari

hasil pengujian balok komposit dengan *web openings* yang dilakukan oleh *Clawson* dan *Darwin* serta analisis terhadap penggunaan pengaku (perkuatan) dan tanpa pengaku pada *web openings*.

### I.3 Batasan Masalah

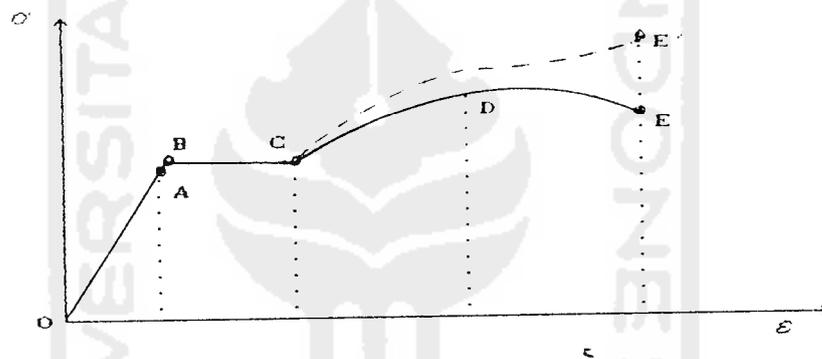
Mengingat banyaknya permasalahan yang berhubungan dengan perencanaan balok komposit dengan *web openings*, maka perlu di beri batasan terhadap analisis yang akan dilakukan. Pembatasan tersebut meliputi hal-hal sebagai berikut ini.

1. Bentuk *web openings* yang ditinjau segi empat dengan tinggi, lebar dan letak lubangnya mengikuti pola potongan yang teratur.
2. Tegangan leleh baja,  $F_y$  adalah 36 Ksi, dan kekuatan tekan beton,  $f_c$  adalah 3000 psi.
3. Struktur diletakkan di atas dua tumpuan sederhana (*simple beam*) dengan panjang bentangan 33,75 feet, dan jarak antar gelagar sejauh 8 feet.

BAB II  
TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Sifat-sifat Baja Struktur

Suatu diagram tegangan-regangan normal tipikal dapat dilihat pada gambar 2.1. Tampak bahwa hubungan antara tegangan dan regangan pada OA linear, sedangkan di atas titik A diagram tidak linear lagi, sehingga titik A disebut



Gambar 2.1 Diagram tegangan-regangan baja struktur

sebagai batas sebanding (*proporsional limit*). Tegangan yang terjadi pada titik A ini disebut tegangan batas sebanding  $\sigma_p$ . Sedikit di atas titik A terdapat titik batas elastis bahan. Hal ini berarti bahwa batang yang dibebani sedemikian sehingga tegangan yang timbul tidak melampaui  $\sigma_e$ , dan panjang batang akan kembali ke panjang semula jika beban dihilangkan. Pada umumnya tegangan  $\sigma_p$  dan  $\sigma_e$  relatif cukup dekat, sehingga seringkali kedua tegangan tersebut dianggap sama, yaitu sebesar  $\sigma_e$ . Regangan  $\epsilon$  yang

timbul pada saat benda uji putus, pada umumnya berkisar sekitar 150 - 200 kali regangan elastis  $\epsilon_e$ . Di atas tegangan elastis  $\sigma_e$ , pada titik B baja mulai leleh. Tegangan di titik B disebut sebagai tegangan leleh  $\sigma_y$ . Pada saat leleh ini, seperti terlihat pada gambar 2.1 baja masih mempunyai kekuatan. Hal ini berarti bahwa pada saat leleh, baja masih mampu menghasilkan gaya perlawanan. Bentuk kurva pada bagian leleh ini, mula-mula mendekati datar, berarti tidak ada tambahan tegangan sekalipun regangan bertambah. Hal ini baja masuk ke dalam selang plastis dan berakhir pada saat terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*) di titik C, kurva naik ke atas lagi sampai dicapai kuat tarik (*tensile strength*) di titik D. Setelah itu, kurva turun dan benda uji putus (*fracture*) di titik E.

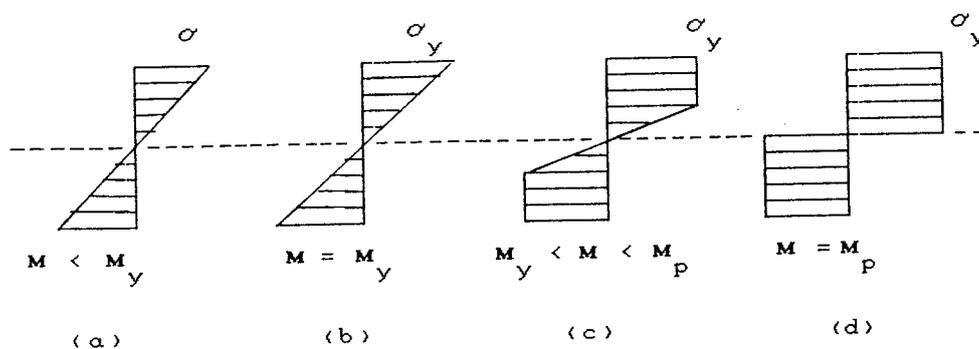
Diagram tegangan-regangan ini dibuat berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian bahan, dengan anggapan luas tampang benda uji tidak mengalami perubahan selama pembebanan. Menurut hukum *Hooke*, suatu batang yang dibebani tarikan secara *uniaksial*, luas tampangnya akan mengecil. Sebelum titik C perubahan luas tampang itu cukup kecil, maka pengaruhnya dapat diabaikan. Tetapi setelah sampai pada fase pengerasan regangan, hukum *Hooke* tidak berlaku lagi, tampang mengalami penyempitan yang cukup besar. Kalau penyempitan itu diperhitungkan dalam penggambaran diagram, akan diperoleh kurva dengan garis putus-putus (gambar 2.1). Besar tegangan pada titik-titik A, B, C, D dan E tersebut di atas, dipengaruhi oleh jenis baja yang diuji.

Berdasarkan besar tegangan leleh, ASTM membagi baja dalam empat kelompok, dengan kisaran tegangan leleh sebagai berikut:

1. *Carbon Steels*, tegangan leleh 210 - 280 MPa,
2. *High-strength low-alloy steels*, tegangan leleh 280 - 490 MPa,
3. *Heat treated carbon and high-strength low-alloy steels*, tegangan leleh 322 - 700 MPa,
4. *Heat-treated constructional alloy steels*, tegangan leleh 630 - 700 MPa.

## II.2 Perencanaan Berdasarkan Kekuatan Batas

Perencanaan pada kekuatan batas berada pada selang plastis, selang yang berada antara *limit proporsional* atau batas elastis dengan batas pada saat terjadinya pengerasan regangan (*strain hardening*). Penampang yang mengalami momen lentur yang semakin besar diperlihatkan pada gambar 2.2. Gambar 2.2a menunjukkan distribusi tegangan pada penampang akibat momen lentur pada tahap awal. Gambar 2.2b menunjukkan bahwa serat penampang terluar mulai leleh dan



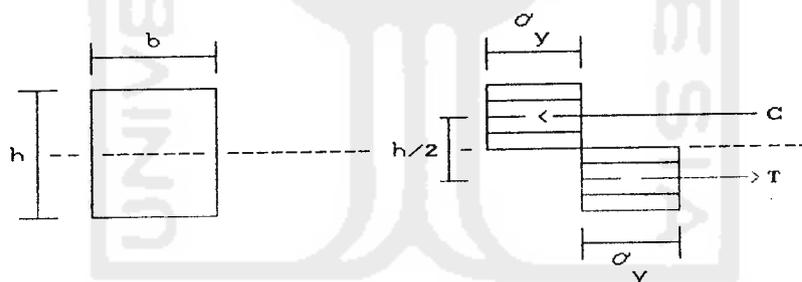
Gbr.2.2 Distribusi Tegangan pada tiap tahap pembebanan

kapasitas momen ini disebut *momen leleh* ( $M_y$ ). Gambar 2.2c menunjukkan sebagian penampang telah mencapai tegangan leleh dan sebagian yang lain belum, sedangkan gambar 2.2d menunjukkan bahwa seluruh penampang telah mencapai tegangan lelehnya dan seluruh serat dalam keadaan plastis, kapasitas momen yang menyebabkannya disebut *momen plastis* ( $M_p$ ). Penampang yang mencapai momen plastis ini disebut dengan engsel/sendai plastis.

### II.2.1 Momen Plastis pada Penampang

Besarnya momen plastis suatu penampang dihitung sebagai berikut:

#### a. Penampang segi empat



Gambar 2.3a. Penampang segi empat dan gaya-gaya

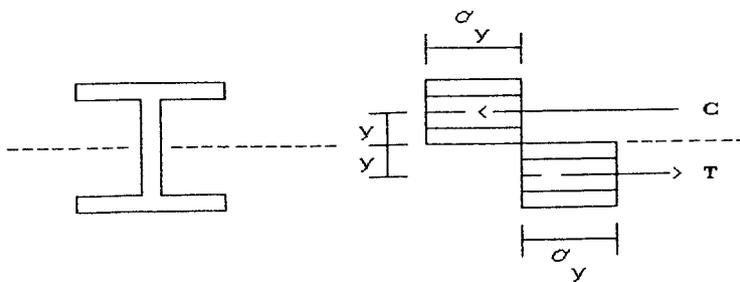
$$C = T = 1/2 (b)(h)(\sigma_y)$$

$$M_p = C (h/2) = 1/4 (b)(h^2)(\sigma_y)$$

#### b. Penampang I

$$C = T = (A/2)(\sigma_y)$$

$$M_p = C (2y)$$



Gambar.2.3b. Penampang I dan Gaya-gaya

### II.2.2 Faktor Beban

Faktor beban pada perhitungan kekuatan batas dimasukkan pada beban yang bekerja. Besar faktor beban ini menurut spesifikasi *Load and Resistance Factor Design (LRFD) American Institute of Steel Construction (AISC)* adalah:

1.  $1,4D$
2.  $1,2D + 1,6L + 0,5(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R)$
3.  $1,2D + 1,6(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) + (0,5L \text{ atau } 0,8W)$
4.  $1,2D + 1,3W + 0,5L + 0,5(L_r \text{ atau } S \text{ atau } R)$
5.  $1,2D + 1,5E + (0,5L \text{ atau } 0,2S)$
6.  $0,9D - (1,3W \text{ atau } 1,5E)$

dengan:  $D$  = beban mati

$L$  = beban hidup

$L_r$  = beban hidup atap

$W$  = beban angin

$S$  = beban salju

$E$  = beban gempa

$R$  = beban air hujan atau beban es

## II.3 Konstruksi Balok Komposit

### II.3.1 Pengertian Konstruksi Balok Komposit

Aksi komposit timbul bila dua batang struktural pemikul beban seperti konstruksi lantai beton dan balok baja penyanggah dihubungkan cara integral dan melendut secara satu kesatuan.

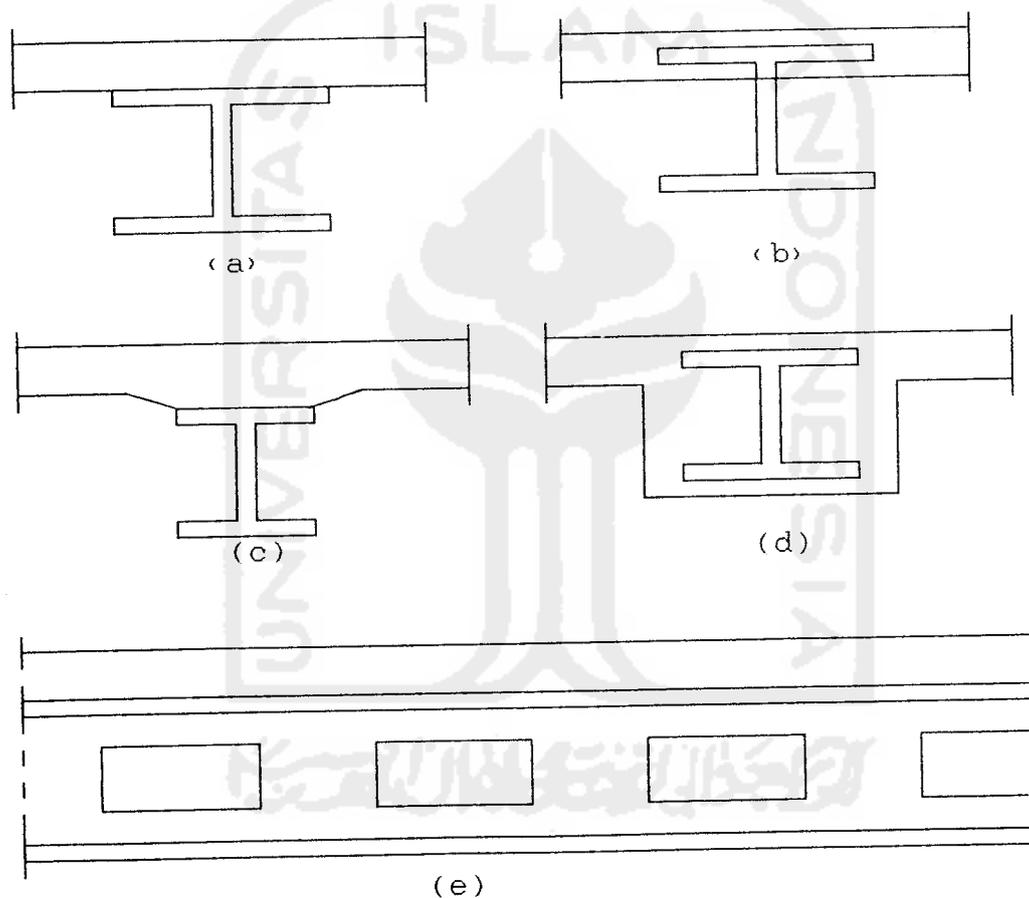
Pada bangunan-bangunan sipil, konstruksi balok baja yang bekerja satu kesatuan dengan lantai beton banyak sekali dijumpai, karena efisiensi dari sistem ini akan banyak sekali pengaruhnya terhadap biaya bangunan tersebut. Secara umum dapat dikatakan bahwa apabila terdapat lantai beton dengan pemikulnya balok baja, akan lebih ekonomis apabila dibuat suatu kerja sama yaitu menjadi suatu balok komposit.

### II.3.2 Proses Kerja Komposit

Dimulainya kerja komposit adalah pada saat sistem lantai beton dengan pemikul balok baja yang dibuat bekerja sama menjadi satu kesatuan untuk memikul beban. Contoh-contoh khas dari penampang melintang komposit dapat dilihat pada gambar 2.4.

Dalam pengembangan konsep perilaku komposit, pertimbangan pertama pada balok non komposit seperti gambar 2.5a, jika gesekan antara lapisan beton dan balok diabaikan, maka beban akan dipikul oleh lapisan beton dan balok secara terpisah. Lebih lanjut pada gambar 2.6a diperlihatkan ketika terjadinya deformasi pada lapisan

beton akibat beban vertikal, pada permukaan atas terjadi desakan dan pada permukaan bawah terjadi tarikan. Dengan demikian diskontinuitas terjadi pada bidang kontak. Sejak itu gesekan diabaikan, hanya gaya-gaya dalam vertikal yang bekerja pada lapisan beton dan balok. Pada saat sistem bekerja secara komposit, maka tidak ada slip antara lapisan beton dan balok.



Gambar 2.4 Berbagai tipe penampang komposit

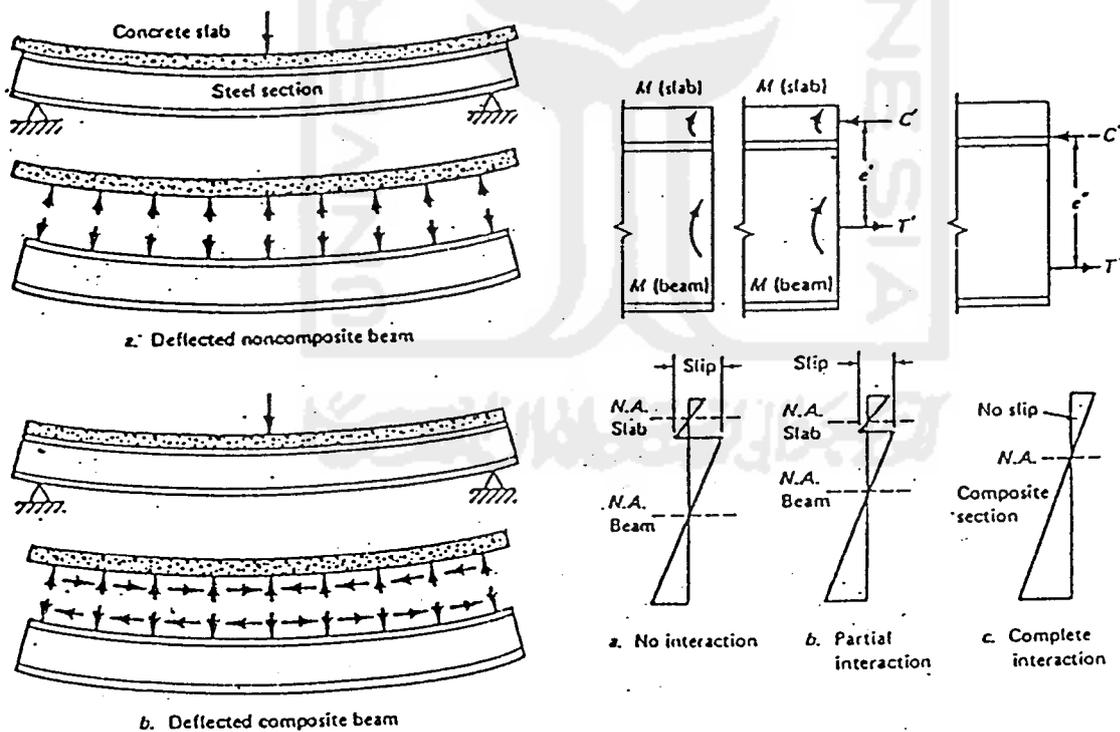
Pada saat tidak ada interaksi antara lapisan beton dan baja, maka menurut pemeriksaan distribusi tegangan (gambar 2.6a) menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi

adalah:

$$M = M_{beton} + M_{balok}$$

Untuk kasus seperti ini terdapat dua buah sumbu/garis netral; satu pada titik berat lapisan beton dan yang lainnya pada titik berat balok baja.

Pada kasus berikutnya (gambar 2.6b) adalah interaksi parsial, maka garis netral lapisan beton lebih dekat terhadap balok dan sebaliknya garis netral balok lebih dekat terhadap lapisan beton. Disebabkan interaksi parsial, slip horizontal yang terjadi menurun. Hasil



Gbr.2.5 Perbandingan lendutan dengan dan tanpa kerja komposit

Gbr.2.6 Distribusi tegangan

interaksi parsial tadi yaitu penambahan parsial dari gaya tekan  $C'$  dan gaya tarik  $T'$ , selanjutnya disebut kapasitas maksimum lapisan beton dan balok baja. Momen penampang ditingkatkan besarnya menjadi  $T'e'$  atau  $C'e'$ .

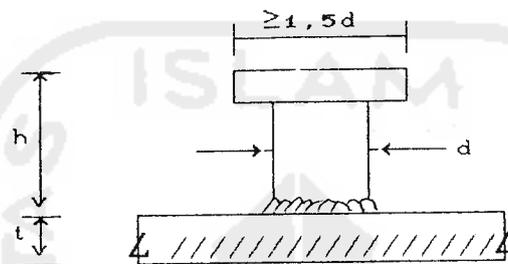
Apabila interaksi sudah lengkap antara lapisan beton dan balok baja, lalu slip sudah tidak terjadi lagi, maka diagram tegangan yang dihasilkan adalah seperti gambar 2.6c. Dengan kondisi ini, hanya ada satu garis netral yang terletak pada balok baja di bawah lapisan beton. Sebagai tambahan, gaya tekan  $C''$  dan gaya tarik  $T''$  terjadi lebih besar dari pada  $C'$  dan  $T'$  yang ada pada interaksi parsial, sehingga momen yang terjadi adalah  $M = T'' \cdot e''$  atau  $M = C'' \cdot e''$ .

#### II.4 Alat Penghubung Geser (*Shear Connectors*)

Pada konstruksi komposit antara baja dan beton diperlukan adanya penghubung antara kedua bahan tersebut. Penghubung tersebut berfungsi untuk memindahkan gaya geser dari beton ke baja, oleh karena itu sering disebut sebagai penghubung geser atau lebih dikenal dengan *shear connectors*. Disamping itu *shear connector* tersebut berfungsi pula untuk menahan gaya geser agar tidak terjadi perpindahan vertikal antara kedua bahan tersebut.

Tipe konektor yang umum dipakai adalah *stud connectors* (gambar 2.7) dengan diameter antara 13 mm - 25 mm dan panjang ( $h$ ) antara 65 mm - 100 mm. Berdasarkan *British Specifications* tentang struktur komposit untuk

bangunan dan jembatan mengharuskan bahwa stud yang terbuat dari baja, perpanjangan minimumnya sebesar 18% dan tegangan leleh karakteristik tidak kurang dari  $400 \text{ N/mm}^2$ . Pelaksanaan stud menjadi elemen dari baja dilakukan dengan alat pengelasan yang otomatis. Keuntungan-keuntungannya adalah proses pengelasan lebih cepat dan sederhana.

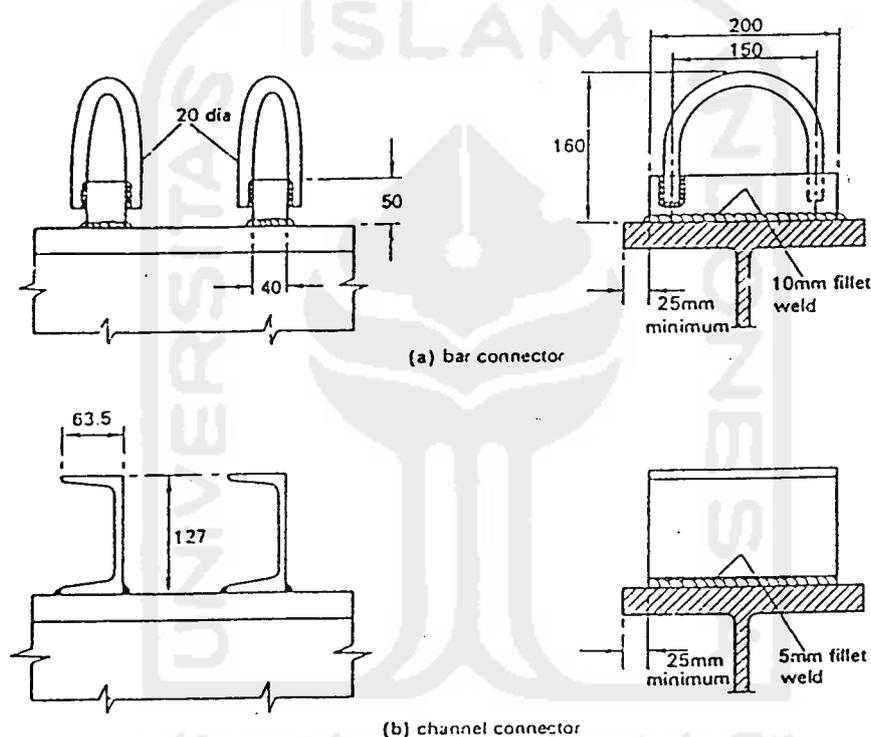


Gambar 2.7 Stud Connector

Ada dua faktor yang mempengaruhi diameter stud, pertama sulit melakukan pengelasan untuk diameter yang melebihi 19 mm dan kedua, mengenai ketebalan pelat atau sayap tempat stud tersebut dilaskan. Penyelidikan yang dilakukan di Amerika menyatakan bahwa kekuatan statik penuh stud dapat meningkat, jika perbandingan  $d/t < 2,7$ , sedangkan di Inggris  $d/t < 2,0$ . Dengan pembebanan yang berulang kali pada percobaan, menunjukkan bahwa pelat pada sayap yang dipengaruhi tegangan tarik  $d/t < 1,5$ , sehingga gaya geser maksimum yang dapat dipikul oleh stud adalah relatif rendah yaitu kira-kira 150 kN. Tipe-tipe konektor yang lain yang lebih besar kekuatannya telah berkembang, terutama digunakan pada jembatan. Konektor ini adalah *bar* dengan *hoop* (gambar 2.8a), *tee* dengan *hoop*, *horseshoes* dan

*canal* (gambar 2.8b). Ukuran-ukuran yang terbesar ditunjukkan dalam gambar. *Bar* dengan *hoop* adalah paling kuat di antara konektor yang lainnya, dengan kekuatan geser ultimit di atas 1000 kN, akan tetapi tipe ini tidak dapat digunakan pada dek baja.

Berdasarkan percobaan tekan terhadap *shear connector*

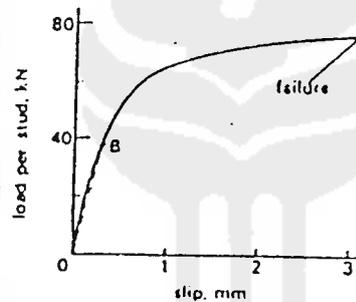


Gambar 2.8 Tipe Shear Connector/Penghubung Geser

maka diperoleh hubungan antara slip-beban (gambar 2.9) yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. jumlah konektor yang digunakan dalam percobaan,
2. tegangan longitudinal rata-rata pelat beton di sekitar konektor,

3. ukuran, susunan dan kekuatan beton bertulang di sekitar konektor,
4. ketebalan di sekeliling konektor,
5. kebebasan dasar tiap lapisan untuk bergerak ke arah samping (*lateral*), begitu juga menentukan gaya-gaya ke atas pada konektor,
6. lekatan pada bidang pemisah antara baja-beton,
7. kekuatan pelat beton,
8. tingkat pemadatan pada beton sekitar alas tiap konektor.



Gambar 2.9 Hubungan antara Slip-Beban

Alat penghubung stud berkepala (*headed stud*) atau stud bengkok (*hooked stud*) menurut spesifikasi AASHTO 1977 memakai rumus:

$$q_{ult} = 0,4 d_s^2 \sqrt{f'_c \cdot E_c} \quad \text{untuk } H/d_s \geq 4 \quad \dots \dots (2.1)$$

dengan:

$H$  = tinggi stud (in),

$d_s$  = diameter stud (in),

$q_{ult}$  = kapasitas alat penghubung (lb) untuk satu stud,

$f'_c$  = kekuatan tekan beton (psi),

$E_c$  = modulus elastisitas beton (psi).

AISC-1.11 memakai konsep kekuatan batas tetapi mengubah gaya yang harus direncanakan dan kapasitas alat penghubung geser ke daerah beban kerja dengan membaginya dengan faktor nominal 2. Jadi untuk perencanaan pada beban kerja adalah:

$$V_h = \frac{C_{maks}}{2} = \frac{0,85f'_c A_c}{2} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$V_h = \frac{T_{maks}}{2} = \frac{A_s F_y}{2} \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan:

$V_h$  = gaya geser horizontal yang harus ditahan antara momen positif maksimum dan titik momen nol; nilai terkecil yang dipakai,

$f'_c$  = kekuatan tekan beton 28 hari,

$A_c = b_e t_s$  = luas beton efektif,

$A_s$  = luas balok baja,

$F_y$  = tegangan leleh untuk balok baja.

Beban yang diijinkan untuk stud bengkok atau berkepala dan kanal menurut AISC ditunjukkan dalam Tabel 2.1a. Bila beton berbobot ringan digunakan, nilai-nilai dalam Tabel 2.1a harus dikalikan dengan koefisien yang dicantumkan dalam Tabel 2.1b. Jumlah alat penghubung geser yang diperlukan,  $N_1$ , diperoleh dengan membagi nilai  $V_h$

terkecil dengan gaya geser yang diijinkan pada satu alat penghubung:

$$N_1 = \frac{V_h \text{ terkecil}}{q} \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan  $q$  adalah beban yang diijinkan dari Tabel 2.1a.

Tabel 2.1a Beban Geser Horizontal yang diijinkan untuk Satu Alat penghubung (dari AISC-1.11.4)

Alat penghubung	Beban Geser Ijin $q$ (kip) (Berlaku hanya bagi beton dengan berat normal)		
	Kekuatan beton, $f'_c$ (psi)		
	3000	3500	4000
Stud bengkok atau berkepala 2" dengan diameter 1/2"	5,1	5,5	5,9
Stud bengkok atau berkepala 2,5" dengan diameter 5/8"	8,0	8,6	9,2
Stud bengkok atau berkepala 3" dengan diameter 3/4"	11,5	12,5	13,3
Stud bengkok atau berkepala 3,5" dengan diameter 7/8"	15,6	16,8	18,0
Kanal C3 x 4,1	4,3W*	4,7W	5,0W
Kanal C4 x 5,4	4,6W	5,0W	5,3W
Kanal C5 x 6,7	4,9W	5,3W	5,6W

\*W = panjang kanal, inci

Tabel 2.1b Faktor Reduksi untuk Kapasitas Alat Penghubung pada Beton dengan Agregat yang berbobot Ringan\*

Berat Satuan Kering, Pcf	90	95	100	105	110	115	120
Koefisien untuk :							
$f'_c < 4,0$ ksi	0,73	0,76	0,78	0,81	0,83	0,86	0,88
$f'_c > 5,0$ ksi	0,82	0,85	0,87	0,91	0,93	0,96	0,99

\* Agregat ASTM C330

## II.5 Balok Komposit Dengan *Web Openings*

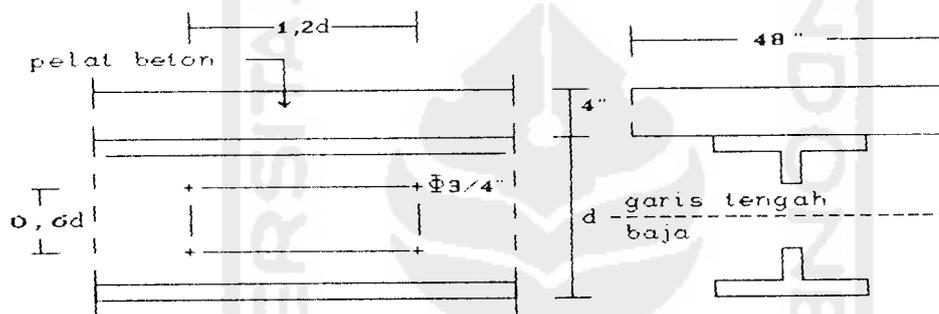
Analisis balok komposit dengan *web openings* telah banyak dibicarakan oleh para ahli antara lain: *Todd* dan *Cooper*, *Donoghue* dan *Wong*, serta *Darwin* dan *Clawson*. Kedua ahli yang terakhir ini telah melakukan percobaan, yang hasil percobaannya digunakan sebagai pedoman dalam penulisan tugas akhir ini.

### II.5.1 Dasar-dasar penelitian *Clawson* dan *Darwin*

Maksud utama dari penelitian percobaan adalah untuk memahami kurva interaksi momen-geser dengan ukuran-ukuran balok tertentu dan batasan-batasannya pada suatu konfigurasi *opening*. Agar tercapai tujuan ini dilakukan pengujian dengan menetapkan letak lubang dan besarnya perbandingan momen-geser yang berkisar antara 3 sampai 33 ft (0,9 sampai 10 m). Hal itu lebih umum disebut rasio  $M/V$ , seperti halnya perbandingan normalisasi bentang-geser terhadap tinggi balok,  $M/V_d$  pada beton bertulang. Hal ini untuk balok-balok komposit membutuhkan dengan perhatian yang teliti, namun untuk keperluan penelitian, maka nilai-nilai aktual  $M/V$  akan digunakan. Untuk pengujian keenam bentang balok, digunakan dua penampang baja yang berbeda. Hal ini tidak hanya dimungkinkan untuk membuat suatu perbandingan dengan jenis kegagalan, namun didapat juga informasi pengaruh bentuk geometri dari balok. Empat pengujian menggunakan ukuran penampang yang sama (walaupun satu balok sedikit berbeda dari lainnya yang merupakan perubahan bentuk balok di dalam AISC). Dua

balok lainnya menggunakan penampang yang lebih kecil.

Semua *Web openings* berbentuk empat persegi panjang dan sesuai dengan garis tengah potongan baja (gambar 2.10). Ukuran *opening* adalah tetap, dengan ukuran tinggi *opening* ditetapkan 60% dari tinggi balok baja dan panjang *opening* sama dengan dua kali tinggi *opening*. Ukuran dimensi pelat beton adalah sama untuk ke enam balok.

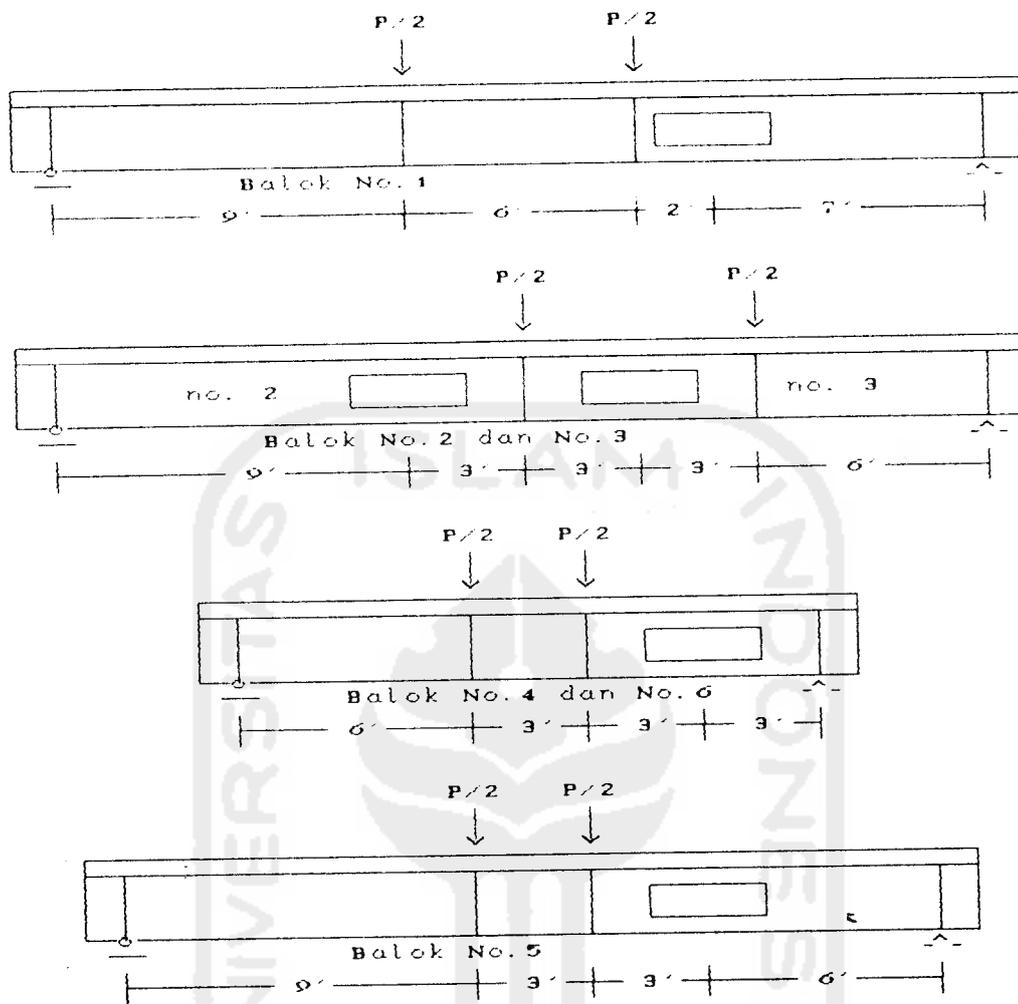


Gambar 2.10 Balok Komposit dengan *web opening*

### II.5.2 Perencanaan Balok *Clawson* dan *Darwin*

Perencanaan keenam balok komposit secara umum mengikuti spesifikasi perencanaan AISC (*American Institute Steel Construction*). Meskipun demikian, karena balok-balok dibebani sampai runtuh, metode perencanaan yang digunakan adalah kekuatan batas. Dalam semua kasus, kapasitas desak aksial pelat beton melebihi kapasitas aksial penampang baja (berarti balok berperilaku tulangan liat). Letak lubang, konfigurasi pembebanan dan bentangan balok ditunjukkan pada gambar 2.11.

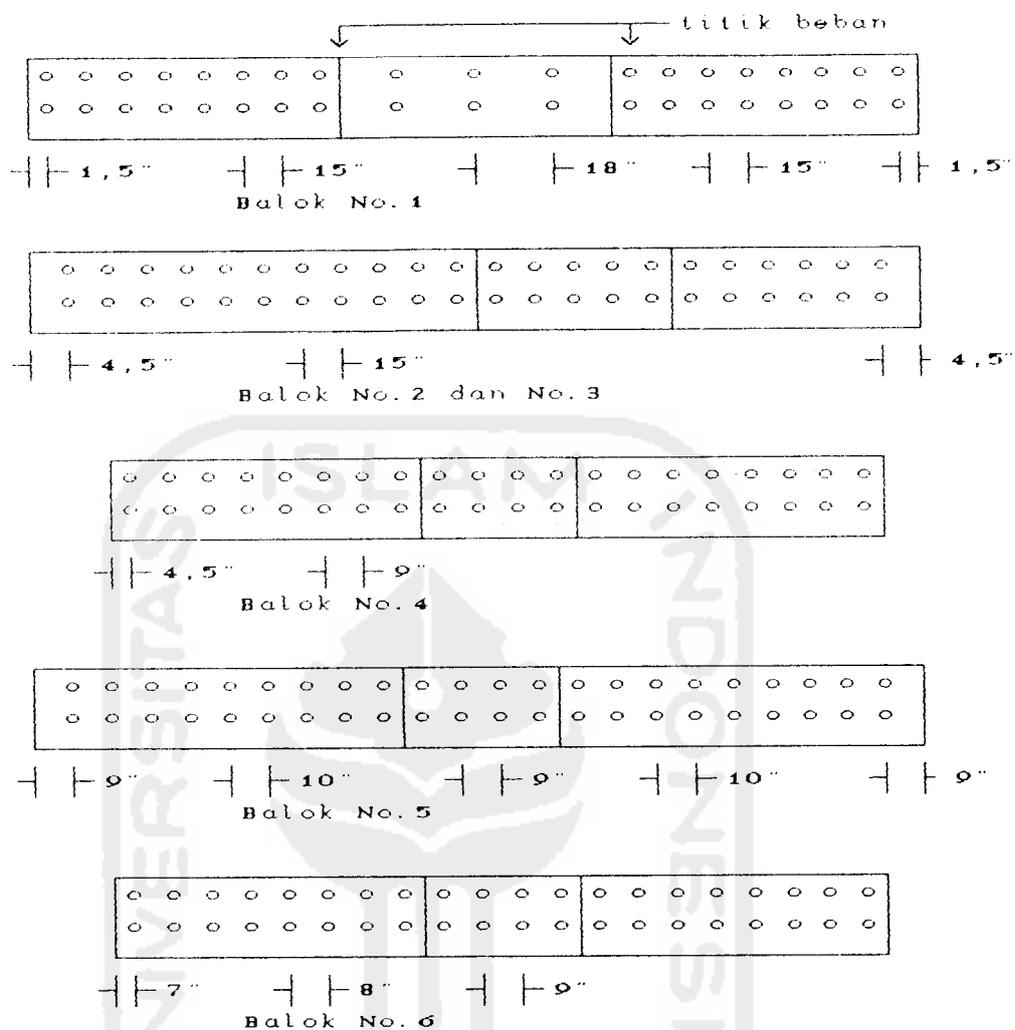
Dalam balok-balok komposit lebar efektif pelat beton



Gambar 2.11 Penempatan *opening*, konfigurasi beban dan panjang bentang (tidak berskala)

ditentukan menurut spesifikasi perencanaan AISC. Untuk percobaan-percobaan tersebut digunakan lebar pelat 48" (1,22 m) dan ketebalannya 4" (102 mm). Lebar pelat beton kurang dari ketentuan lebar efektif, kecuali dua balok yang bentangannya 15 ft (4,58 m), lebar pelat yang dipakai adalah 3" (7,6 cm) lebih lebar dari lebar efektifnya.

Alat penghubung geser yang dipakai berukuran 3" (76 mm) dengan diameter  $3/4$  in (19 mm), ukuran alat penghubung

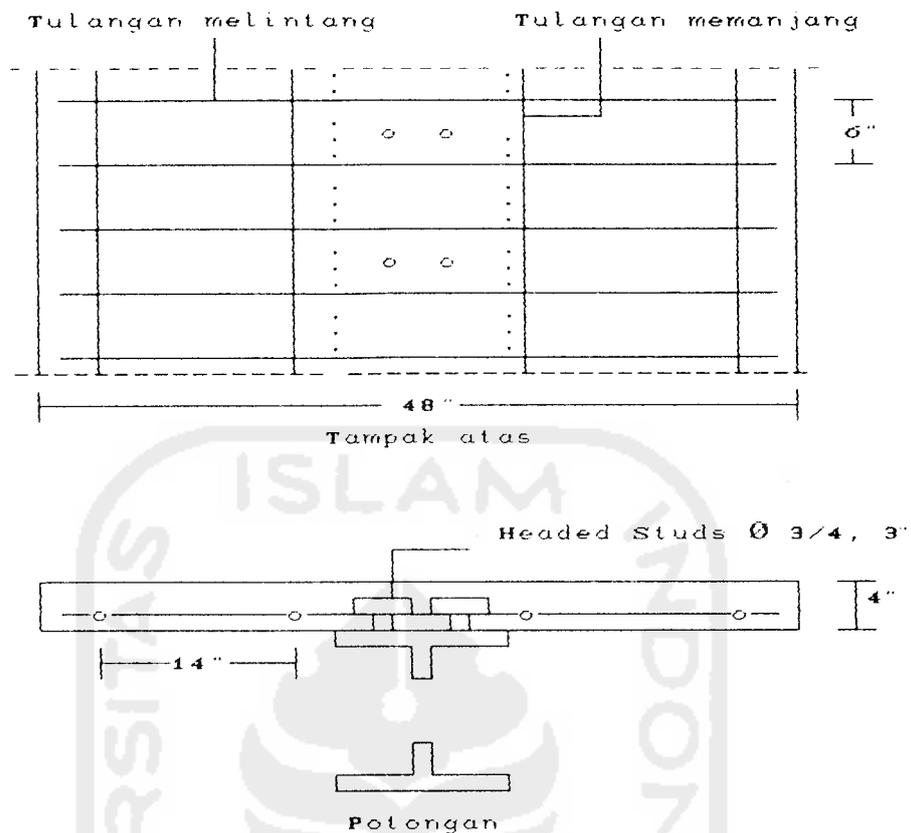


(Gambar 2.12 Penempatan *Headed Stud* (tidak berskala))

geser tersebut sesuai dengan persyaratan AISC, penempatan penghubung geser dan jaraknya dapat di lihat pada gambar 2.12.

Perpasang pengaku di pasang di tiap titik beban terpusat (dukungan dan beban titik). Pelat landasan di pasang pada perletakan balok baja dan pada titik beban terpusat di atas pelat beton.

Pelat beton menggunakan tulangan mengikuti peraturan



Gambar 2.13 Penulangan Pelat Beton

ACI *Building Code*. Pada arah memanjang pelat dipasang tulangan susut sebanyak empat tulangan berukuran 9.5 mm, sedangkan pada arah melintang ditambahkan perkuatan yang bertujuan untuk mereduksi retak-retak memanjang, menggunakan tulangan berdiameter 12.7 mm dengan penempatan antar tulangan 152 mm (gambar 2.13).

### II.5.3 Retak yang terjadi pada beton dalam percobaan *Clawson dan Darwin*

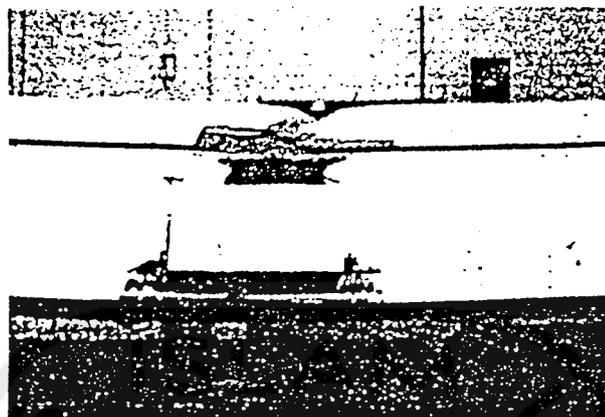
Retak pelat beton terjadi di sekitar *opening* dan pada beberapa balok (no.1, 2 dan 3), pada daerah momen besar di

bagian dalam dekat beban titik. Daerah retakan kritis berada pada bagian atas pelat pada saat momen ujung *openings* rendah, bawah pelat pada saat momen ujung *opening* besar dan di bawah pelat dekat pusat lubang.

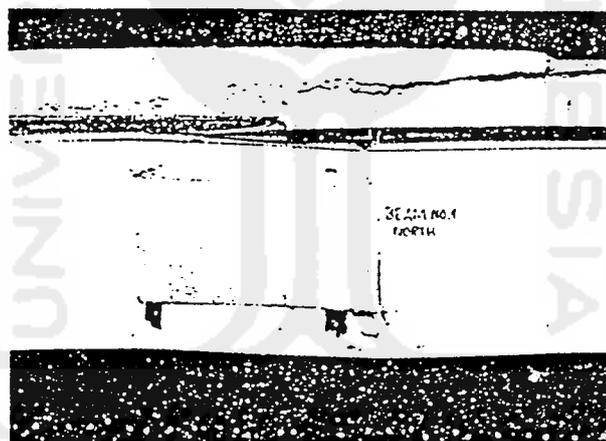
Retak beton pada momen tinggi geser balok kecil (balok no. 3) disebabkan oleh momen lentur primer. Bersamaan dengan mulai luluhnya baja di *tee* bawah, garis netral mulai bergerak ke atas. Apabila tarik melebihi kapasitas tariknya terjadi retak tarik pada bagian bawah pelat. Retak tarik pada bagian bawah pelat juga terjadi dekat titik-titik beban. Sedikit pemisahan antara pelat dan baja terjadi pada saat beban mencapai kurang-lebih setengah beban ultimit. Pada pembebanan ultimit, bagian atas pelat beton runtuh secara hancur (Gambar 2.14a).

Balok-balok dengan ratio  $M/V$  rendah, pola keretakan beton lebih komplek (Gambar 2.14b). Retak pertama terjadi pada permukaan atas pelat pada momen ujung *opening* rendah (mengikuti efek *Vierendeel*), pada  $1/2 - 3/4$  beban ultimit. Segera setelah itu retak pada permukaan bawah pelat pada momen ujung *opening* tinggi. Mulai setelah itu, retak memanjang di pusat permukaan atas pelat mulai terbentuk bersamaan terbentuknya retak pada momen ujung rendah. Retak mulai dekat momen ujung *opening* yang bermomen rendah dan menyebar ke momen ujung *opening* tinggi bersamaan dengan bertambahnya beban.

Retak yang paling jelas mulai terjadi pada saat beban mencapai  $3/4$  beban ultimit, dekat pusat *opening* pada bawah pelat. Pelat beton sedikit terpisah dari sayap baja, dan



Gambar 2.14a Kegagalan Balok no.3



Gambar 2.14b Kegagalan Balok no.4

retak-retak terjadi pada kira-kira  $45^\circ$  melintang permukaan bawah pelat bergerak ke arah momen ujung *opening* tinggi (gambar 2.14b). Pada saat runtuh, retak-retak ini memanjang sampai ke ujung dan menyebar secara diagonal ke arah permukaan atas pelat. Kegagalan tipe geser ini pada

pelat dapat terlihat karena pecahnya beton yang disebabkan oleh penurunan relatif besar diantara ujung-ujung *opening*.

#### II.5.4 Kegagalan (*Failure*) pada percobaan *Clawson* dan *Darwin*

Berdasarkan pada prosedur pembebanan, beberapa balok (no. 1, 2, 3 dan 4) runtuh pada saat beban maksimum tercapai, sedangkan yang lainnya (balok no. 5 dan 6) runtuh pada difleksi tertentu (dan lebih kecil dari beban maksimum yang dicapai selama pengujian) sementara pencatatan data sedang dilakukan. Beban maksimum yang dicapai ditentukan sebagai beban ultimit.

Tabel 3 menyajikan ringkasan hasil percobaan, meliputi beban pada saat awal luluh, beban maksimum dan tipe mode runtuh. Gambar 2.15 menunjukkan kekuatan ultimit (beban yang dipakai di tambah beban mati) pada suatu diagram interaksi momen-geser. Momen ultimit dinormalisasikan terhadap momen lentur murni,  $M_{max}$  berdasarkan perhitungan kekuatan penampang bersih. Kekuatan luluh statik (tabel 1) digunakan dan pengerasan regangan (*strain hardening*) tidak dipertimbangkan. Gaya geser ultimit dinormalisasikan terhadap kuat geser di *opening* untuk panjang bukaan nol (penampang bersih), dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$V_{max} = \left[ 3,5\sqrt{f'_c} \times 3t_c \right] + \left[ \frac{F_{yv} \times A_{vnet}}{\sqrt{3}} \right] \dots \dots \dots (1)$$

dengan:  $V_{max}$  = Kekuatan geser pada penampang bersih (lb),  
 $f'_c$  = Kekuatan desak beton (psi).

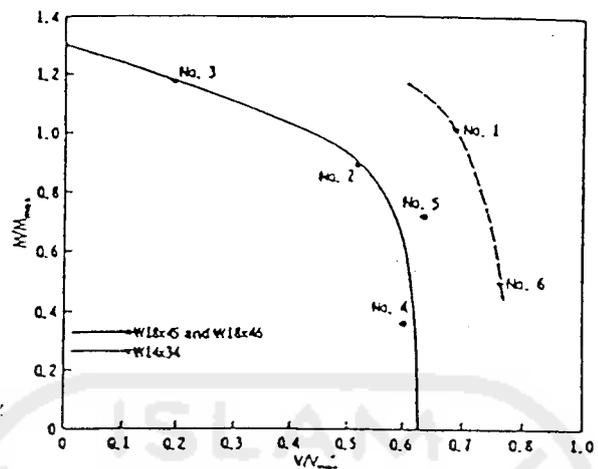
- $t_c$  = tebal pelat beton (in),  
 $F_{yv}$  = luluh statik baja di badan (psi),  
 $A_{vnet}$  = luas netto web pada lubang. (termasuk bagian sayap di atas dan bawah badan).

Gambar 2.15 menunjukkan bahwa pelat beton berperan lebih besar pada balok dengan penampang baja yang lebih kecil (W14x34), dari pada balok dengan penampang lebih besar (W18x45 dan W18x46), dengan kapasitas yang dinormalisasikan terhadap balok 1 dan 6 sangat jelas diatas balok 2 - 5. *Strain hardening* juga sangat berperan. paling tidak untuk *openings* yang ditempatkan pada titik dengan rasio  $M/V$  tinggi. Balok no.3 dengan rasio  $M/V$  sebesar 33 ft (10 m), gagal pada  $1.17 M/M_{max}$ . Gambar 2.15 mengesankan bahwa interaksi antara momen dan gaya geser di *web openings* adalah lemah, yaitu sebelum gaya geser mendekati kapasitas geser penampang, kapasitas momen pada *web opening* relatif tidak dipengaruhi gaya geser.

#### II.5.5. Detail dan Sifat-sifat Balok

Distribusi regangan pada ujung-ujung *tee* bawah dan *tee* atas di plot untuk tiap-tiap balok dalam empat fase pembebanan (elastis, saat luluh, setelah luluh dan runtuh).

Pada setiap balok (kecuali balok No. 1), alat pengukur regangan (*strain gage*) ditempatkan pada atas sayap baja di bawah pelat dan di bawah pelat pada ujung *opening* yang bermomen tinggi untuk menjangkau tingkat

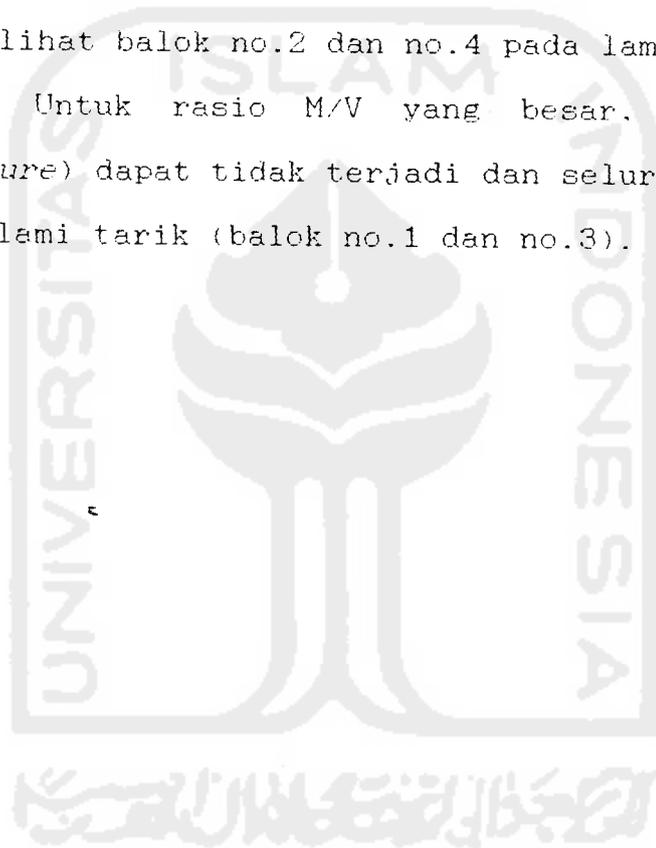


Gambar 2.15 Diagram Interaksi Momen-Geser Balok-balok Percobaan

kesesuaian antara baja dan beton. Alat-alat ukur pada beton ditempatkan ke arah ujung luar pelat. Pembacaan regangan menunjukkan ketidak-sesuaian antara baja dan beton: pada alat ukur beton terbaca nilai tarik, sedangkan pada alat pengukur baja terbaca nilai desak. Pengaruh ini diamati untuk setiap tahap-tahap pembebanan pada balok, kecuali balok no.2 (lampiran gambar 2) pada alat pengukur baja pada atas sayap menunjukkan pengaruh ini sampai beban ultimit didekati, ketika itu alat ukur regangan menunjukkan tarik. Mungkin ketidak-sesuaian regangan ini disebabkan oleh terjadinya slip antara baja dan beton, meskipun beberapa lenturan melintang pada pelat dapat memberikan kontribusi pada perbedaan bacaan. Adanya slip antara permukaan baja dan beton ditunjukkan oleh nilai slip yang diukur pada dukungan.

Beberapa model analisis menggunakan metoda *Vierendeel*

yang menganggap bahwa titik balik (*contraflexure*) terletak pada pusat *opening* pada kedua *tee* atas dan *tee* bawah. Hasil percobaan menunjukkan bahwa ini benar untuk kasus elastis, tetapi tidak untuk kejadian mendekati beban ultimit. Pada saat luluh terjadi titik balik (*contraflexure*) cenderung bergerak ke arah yang bermomen ujung *opening* rendah. Kecenderungan ini memperkecil pengaruh momen sekunder pada momen ujung *opening* yang tertinggi (lihat balok no.2 dan no.4 pada lampiran gambar 2 dan 3). Untuk rasio  $M/V$  yang besar, titik balik (*contraflexure*) dapat tidak terjadi dan seluruh *tee* bawah dapat mengalami tarik (balok no.1 dan no.3).

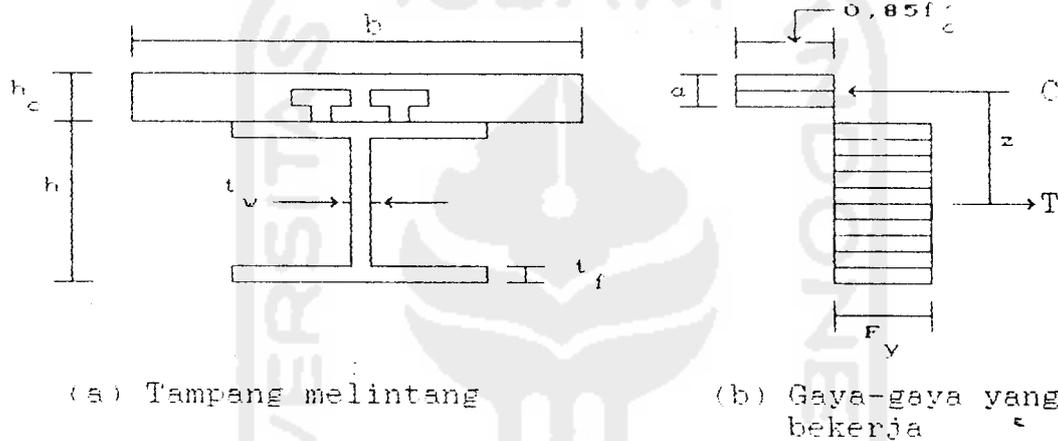


### BAB III

#### ANALISIS BALOK KOMPOSIT DENGAN WEB OPENINGS

##### III.1 Pendahuluan Mengenai Aksi Komposit

Pada analisis kekuatan suatu balok komposit, momen yang terjadi adalah momen kopel yang dihasilkan dari interaksi balok komposit dengan pelat, lihat gambar 3.1.



Gambar 3.1 Penampang Balok Komposit

Momen tersebut dinyatakan dengan persamaan dibawah ini.

$$\begin{aligned}
 M_u &= C.z \\
 &= 0,85.A_c.f'_c.(h/2 + h_c - a/2) \dots\dots\dots(3-1)
 \end{aligned}$$

atau:

$$\begin{aligned}
 M_u &= T.z \\
 &= A_s.F_y.(h/2 + h_c - a/2) \dots\dots\dots(3-2)
 \end{aligned}$$

dengan:

- $A_c$  = Luas efektif beton.
- $f'_c$  = kekuatan tekan beton.

$A_s$  = Luas netto penampang baja,

$F_y$  = Tegangan leleh baja.

dari persamaan (3-1) dan (3-2) dipakai nilai  $M_u$  terkecil.

Kapasitas atau kekuatan penghubung geser berfungsi dalam mengukur besarnya aksi komposit yang bekerja pada balok. Hubungan antara  $F_c$  dan jumlah penghubung geser tidak linier, sebagai akibatnya kekakuan dan kekuatan penampang juga merupakan fungsi yang non linier terhadap jumlah penghubung geser. Hubungan empirisnya ditentukan sebagai berikut ini.

$$I_{\text{eff}} = I_s + \left( \frac{V_h'}{V_h} \right)^\alpha \cdot (I_{\text{tr}} - I_s) \dots \dots \dots (3.3)$$

dengan:

$I_{\text{eff}}$  = Momen inersia efektif ( $\text{in}^4$ ),

$I_s$  = Momen inersia baja ( $\text{in}^4$ ),

$I_{\text{tr}}$  = Momen inersia penampang komposit ( $\text{in}^4$ ),

= angka eksponen,

diambil  $\alpha = 1/2$  sesuai dengan spesifikasi *AISC*,

$$\left( \frac{V_h'}{V_h} \right) = \text{Derajat penghubung geser partial.}$$

$$S_{\text{eff}} = S_s + \left( \frac{V_h'}{V_h} \right)^{1/2} \cdot (S_{\text{tr}} - S_s) \dots \dots \dots (3-4)$$

dengan:

$S_{\text{eff}}$  = Modulus penampang efektif ( $\text{in}^3$ ),

$S_s$  = Modulus penampang baja terhadap bagian flens

bawah yang tertarik ( $\text{in}^3$ ),  
 $S_{tr}$  = Modulus penampang komposit terhadap bagian,  
 flens bawah yang tertarik ( $\text{in}^3$ ).

Sebagian besar penghubung geser parsial kekakuan dan kekuatan penampang mendekati pada penampang baja saja. Jika hal tersebut dianggap bahwa momen pada penampang akan dibagi antara penampang baja dan komposit sebagai fungsi dari derajat penghubung geser parsial, maka:

$$M_t = M_s + \left[ \frac{V'_h}{V_h} \right]^{1/2} \cdot (M_{comp} - M_s) \dots\dots\dots(3-5)$$

dengan:

$M_t$  = Kapasitas momen batas penampang dengan lubang (kips-inch),

$M_s$  = Momen pada batas penampang baja (kips-inch),

$M_{comp}$  = Kapasitas momen penampang komposit penuh,  
 =  $F \cdot z$  (kips-inch)

$$z = \frac{h}{2} + h_c - \frac{a}{2} \quad (\text{inch})$$

$$a = \frac{2T}{0,85(f'_c)(b)} = \frac{F}{0,85(f'_c)(b)} \quad (\text{inch})$$

= tinggi blok tegangan (gambar 3.1),

$V_h$  = gaya geser horizontal pada aksi komposit penuh (kips),

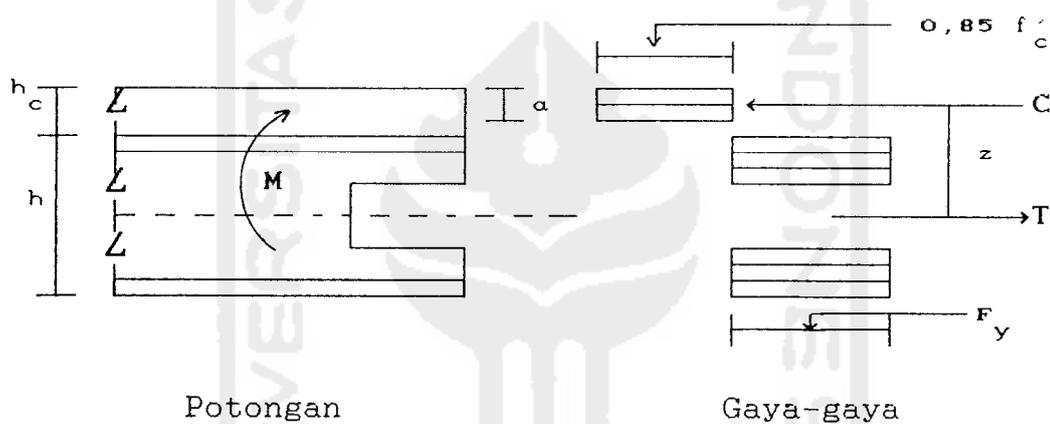
$V'_h$  = kapasitas sesungguhnya dari alat penghubung yang dipakai, pada aksi komposit parsial (kips).

Dalam perencanaan komposit, penentuan kapasitas momen batas tergantung pada letak garis netral, yang dibagi dalam dua kasus yaitu:

- (i). Apabila garis netral memotong pelat beton disebut dengan pelat memadai, yaitu pelat mampu menahan gaya tekan total.

$$C > T ; C = h_c \cdot b \cdot (0,85) \cdot (f'_c) = A_c (0,85) \cdot (f'_c)$$

$$T = A_s \cdot F_y \quad (\text{resultan gaya-gaya tarik})$$



Gambar 3.2a Distribusi Tegangan pada Kekuatan Batas (Pelat memadai  $C = T = F$ )

- (ii) Garis netral memotong balok baja, pelat beton dianggap tidak memadai, yaitu pelat hanya mampu menahan sebagian gaya tekan dan sisanya di tahan oleh balok baja.

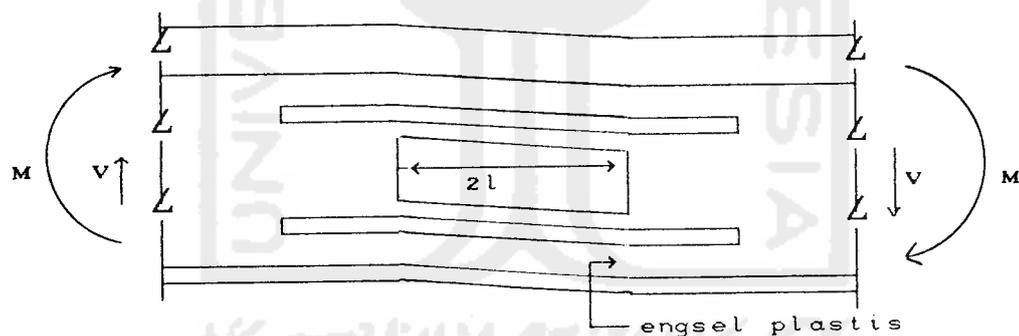
$$T > C ; C + C' = T = F$$



2. Kekuatan tekan beton adalah  $0.85 f'_c$
3. Kekuatan tarik beton diabaikan.
4. Proses leleh pada baja digambarkan oleh kriteria leleh *Von Mises*.
5. Pengerasan regangan (*strain hardening*) dapat diabaikan.
6. *Shear Connectors* menahan gaya geser antara sayap beton dan penampang baja sepanjang bentangan.

Untuk penampang baja dengan *web openings*, dapat diasumsikan sebagai berikut ini.

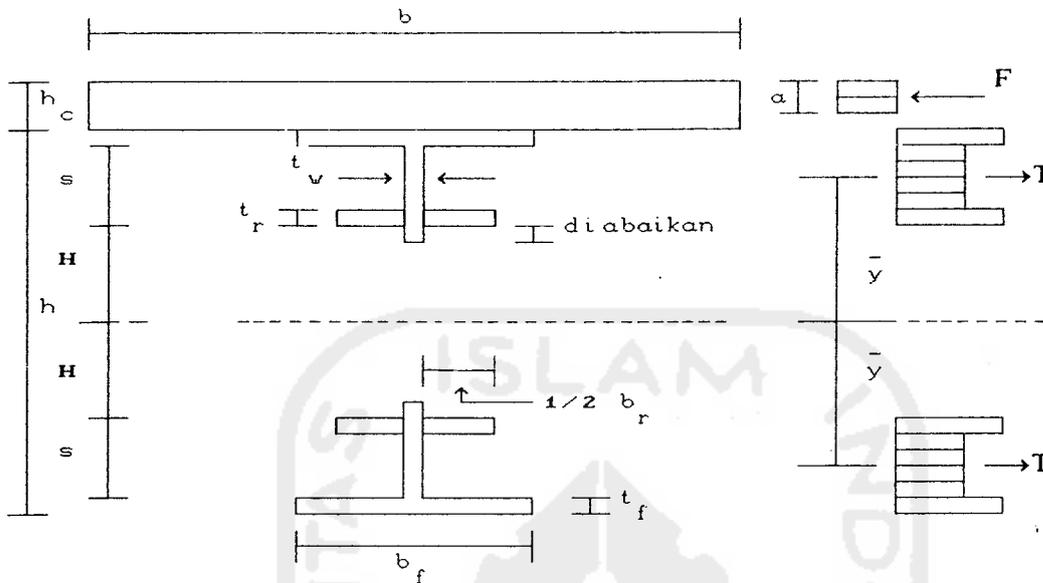
1. Balok akan mengalami kegagalan dengan pembentukan mekanisme engsel-engsel plastis pada keempat tepi atas dan bawah ujung lubang persegi. (Gambar 3.3)



Gambar. 3.3 Mekanisme Runtuh *Web Openings* dengan Pengaku.

2. Bagian dari pengaku-pengaku sayap yang menonjol dan elemen-elemen *web openings* di daerah lubang adalah untuk menghindari tekuk elastis atau non-elastis/kaku.
3. Bentuk lubang diambil persegi empat dan penempatannya mengikuti pola pemotongan disepanjang bentangan.

4. Lubang ditempatkan di tengah-tengah tinggi badan.



Gambar 3.4 Penampang Balok Komposit dengan *Web Openings* menggunakan pengaku.

5. Tegangan tekan pada penampang komposit dibatasi oleh ketinggian sayap beton (garis netral ada di beton) seperti gambar 3.4.
6. Sebagian dari tangkai badan (*web stem*) antara pengaku badan dan lubang dapat diabaikan (gambar 3.4).

### III.3 Teori Balok dengan *Web Openings* dan Momen Lentur

Kriteria kegagalan kasus *web openings* pada profil *tee* akibat gabungan antara tegangan geser dan tegangan tarik, dihubungkan dengan syarat leleh *Von Mises*, diekspresikan sebagai berikut ini.

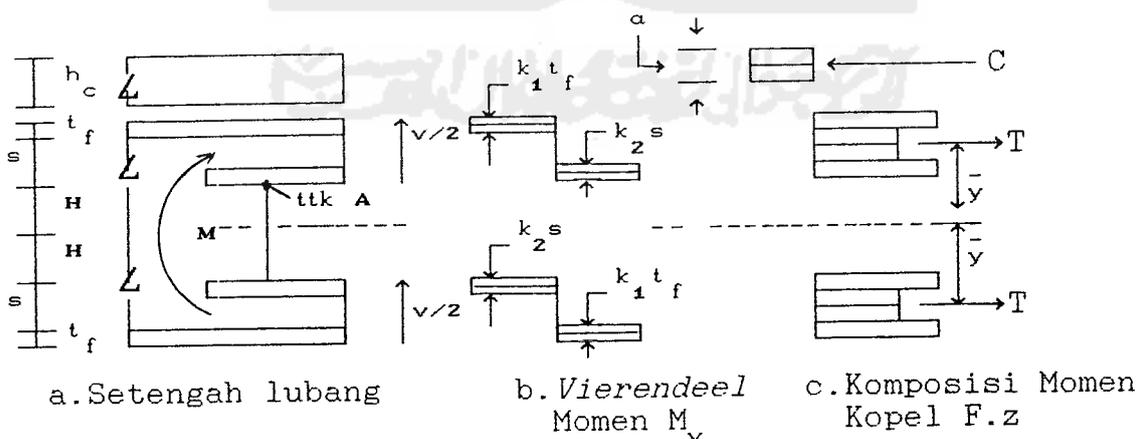
$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 - 3\tau^2} \dots\dots\dots(3-6)$$

$$M_V = \frac{V}{2} \cdot (l) \dots\dots\dots(3-8)$$

$l$  = setengah panjang lubang.

Hubungan gaya geser pada pusat lubang dengan momen sekunder  $M_V$ , disebabkan aksi *Vierendeel* yang mungkin timbul, dengan mengingat syarat-syarat keseimbangan momen plastis pada penghubung atas dan bawah kerangka *tee* dibuat blok-blok tegangan leleh dalam penurunan persamaan gaya dan keseimbangan momen.

Jika perubahan gaya melalui lubang relatif kecil dan balok yang dibebani telah mandekati keadaan ultimit, lalu momen sekunder yang disebabkan aksi *Vierendeel* dapat dilihat menjadi simetris di sekitar lubang. Gaya-gaya geser yang kecil dan momen sekunder dengan akibatnya akan memberikan keseimbangan momen dalam keadaan ultimit, dicapai dengan terjadinya leleh membatasi tebal pengaku dan sayap-sayap (*flens*) pada penampang atas dan bawah lubang (Gambar 3.5).



Gambar 3.5 Gaya-gaya yang bekerja pada tepi lubang

Keseimbangan gaya tersebut adalah:

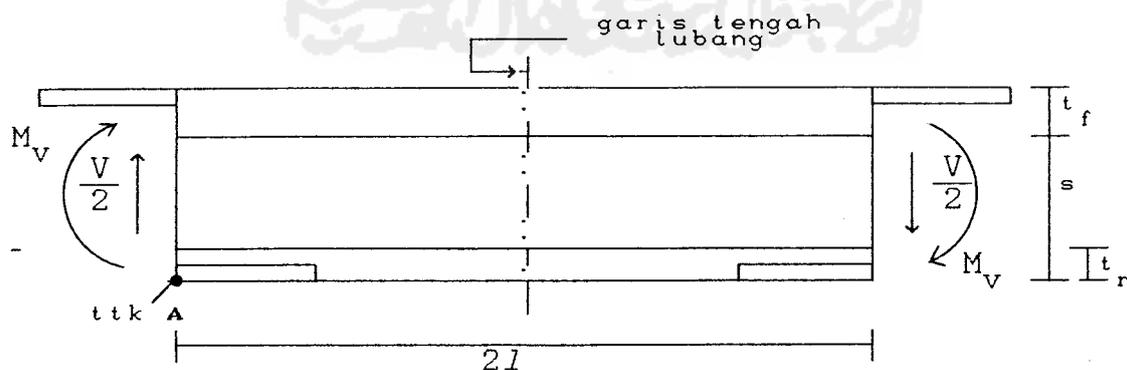
$$k_1 \cdot (t_f \cdot b_f) \cdot \sigma_{yf} = k_2 \cdot s \cdot (t_w \cdot \sigma_v + b_r \cdot \sigma_{yr})$$

$$k_1 \cdot A_f \cdot \sigma_{yf} = k_2 \cdot (A_t \cdot \sigma_v + s \cdot b_r \cdot \sigma_{yr}) \quad \dots\dots\dots (3-9)$$

dengan:

- $k_1$  = fraksi leleh pada tebal flens,
- $A_f$  = luas flens ( $\text{in}^2$ ),
- $\sigma_{yf}$  = tegangan leleh flens (ksi),
- $k_2$  = luas leleh pengaku dan badan pada lubang,
- $A_t$  = luas *stem profil tee* ( $\text{in}^2$ ),
- $s$  = tinggi *stem* (inch),
- $b_r$  = lebar pengaku (inch),
- $\sigma_{yr}$  = tegangan leleh pengaku (ksi).

Keseimbangan momen pada penampang diatas lubang (gambar 3.6) diambil untuk mewakili keempat engsel, dapat dinyatakan dengan mengambil jumlah momen-momen disekitar titik yang terpilih dengan baik pada satu sudut lubang,



Gambar 3.6 Momen *Vierendeel* Ultimit

yaitu titik A (Gambar 3.5 dan 3.6). Momen tersebut dinyatakan sebagai berikut ini.

$$M_V = k_1 \cdot A_f \cdot \sigma_{yf} \cdot \left[ s + t_f - \frac{k_1 \cdot t_f}{2} \right] - \frac{k_2^2 \cdot s}{2} (A_t \cdot \sigma_v + s \cdot b_r \cdot \sigma_{yr}) \dots \dots \dots (3-10)$$

Untuk memberikan nilai-nilai gaya geser total pada penampang, lubang dan dimensi balok, dari dua persamaan (3-9) dan (3-10) diperoleh  $k_1$  dan  $k_2$  yang tidak diketahui.

Bagian penampang dengan perkuatan/pengaku bisa dianggap memadai untuk kebutuhan menahan momen lentur pada penampang menjadi suatu komponen tarik pada balok komposit. Tegangan tarik pada gambar 3.5, dapat dinyatakan sebagai berikut ini.

$$T = A_f \cdot \sigma_{yf} \cdot (1 - k_1) + \sigma_v \cdot A_t \cdot (1 - k_2) + (t_r - k_2 \cdot s) \cdot b_r \cdot \sigma_{yr} \dots \dots \dots (3-11)$$

$$T = T_T = T_B$$

dengan:

$$t_r = \text{tebal pengaku.}$$

Momen resultan T terhadap garis tengah  $\bar{y}$  pada gambar 3.5c dinyatakan sebagai berikut ini.

$$\begin{aligned}
\bar{T}_y &= \sigma_w \cdot A_t \cdot \left(1 - k_2\right) \left[ H + \frac{s}{2} + \frac{k_2 \cdot s}{2} \right] \\
&+ A_f \cdot \sigma_{yf} \cdot \left(1 - k_1\right) \cdot \left[ H + s + \left(\frac{1 - k_1}{2}\right) t_f \right] \\
&+ \left[ t_r - k_2 \cdot s \right] \cdot b_r \cdot \sigma_{yr} \cdot \left[ H + \frac{t_r}{2} + \frac{k_2 \cdot s}{2} \right] \dots (3-12)
\end{aligned}$$

dengan:

$$A_t = s \cdot t_w$$

Mengingat bahwa momen kopel penampang komposit merupakan interaksi pelat beton dengan balok baja (pers.3-1 dan 3-2), dalam kasus komposit penuh, momen di baja mendekati nol, dan kapasitas tarik penampang digunakan oleh aksi komposit. Jumlah momen-momen pada resultan tegangan tarik terhadap garis tengah balok  $\bar{y}$  menjadi:

$$M_s = T_T \cdot \bar{y} - T_B \cdot \bar{y} = 0 \dots \dots \dots (3-13)$$

Sebaliknya dalam kasus non-komposit, momen lentur penampang harus didukung oleh balok baja saja tanpa adanya momen kopel yang disebabkan aksi komposit. Kapasitas momen batas penampang dalam keberadaannya memberikan gaya geser pada lubang, sehingga persamaannya menjadi:

$$M_T = M_s = T_T \cdot \bar{y} + T_B \cdot \bar{y} = 2\bar{T}_y \dots \dots \dots (3-14)$$

$\bar{T}_y$  seperti ditulis pada persamaan (3-12) dan  $M_s$  adalah kapasitas momen non-komposit pada penampang dengan *web opening*.

Dalam pers.(3-9) dan pers.(3-12) telah dianggap bahwa

gaya-gaya geser pada lubang yang besarannya digunakan untuk membatasi proses leleh diperlukan dalam membentuk keseimbangan momen plastis,  $M_v$  dari persamaan (3-10) pada sayap dan pengaku. Apabila momen sekunder  $M_v$ , telah menyebabkan daerah-daerah momen leleh untuk melakukan penyebaran ke dalam *web stem* pada penampang-penampang di daerah lubang, hal seperti ini akan dijelaskan dalam berbagai kondisi dibawah ini.

(a). Dalam penurunan persamaan-persamaan dianggap bahwa semua kasus,  $A_r \cdot \sigma_{yr} \leq A_f \cdot \sigma_{yf}$ , oleh karena itu garis netral plastis atau EAA (*equal area axis*) jatuh pada badan atau pada pengaku yang berbentuk flens pada profil *tee* diatas dan dibawah lubang.

(b). Momen leleh terjadi pada flens dan penyebaran dari pengaku ke *web*. Dalam kasus ini, hal tersebut harus terdapat keseimbangan gaya (Gambar 3.5b),  $t_r \leq k_2 s \leq s$  dan jika  $k_2 s = t_r$ , maka keseimbangan gaya menjadi:

$$k_1 \cdot A_f \cdot \sigma_{yf} = A_r \cdot \sigma_{yr} + k_2 \cdot A_t \cdot \sigma_w \quad \dots\dots\dots(3-15)$$

Keseimbangan momen sekunder diperoleh dari:

$$M_1 = k_1 \cdot A_f \cdot \sigma_{yf} \left[ s + t_f - \frac{k_1 \cdot t_f}{2} \right] - k_2^2 \cdot A_t \cdot \sigma_w \left[ \frac{s}{2} \right] - A_r \cdot \sigma_{yr} \left[ \frac{t_r}{2} \right] \quad \dots\dots\dots(3-16)$$

Gaya tarik yang ada yaitu sebagai berikut ini.

$$T = \left[ 1 - k_1 \right] \cdot A_f \cdot \sigma_{yf} + \left[ 1 - k_2 \right] \cdot A_f \cdot \sigma_w$$

$$= T_B = T_T \dots\dots\dots(3-17)$$

Momen akibat gaya-gaya yang bekerja terhadap garis tengah balok adalah:

$$\begin{aligned} T_{\bar{y}} = & A_t \cdot \sigma_v \left(1 - k_2\right) \left[ H + s + \left( \frac{1-k_2}{2} \right) s \right] \\ & + A_f \cdot \sigma_{yf} \left(1 - k_1\right) \left[ H + s + \left( \frac{1-k_1}{2} \right) t_f \right] \\ & \dots\dots\dots(3-18) \end{aligned}$$

(c). Apabila garis netral plastis (*EAA*) jatuh dibagian web (dengan jumlah pengaku yang lebih besar), momen-momen sekunder memerlukan kelelahan atau pemutaran tegangan menuju web dari kedua pengaku dan flens pada penampang, dalam hal ini.

$$A_f \cdot \sigma_{yf} + k_1 \cdot A_t \cdot \sigma_v = A_r \cdot \sigma_{yr} + k_2 \cdot A_t \cdot \sigma_v \dots\dots\dots(3-19)$$

Momen sekunder yang diperlukan adalah:

$$\begin{aligned} M_t = & A_t \cdot \sigma_{yf} \left( s + \frac{t_f}{2} \right) + k_1 \cdot A_t \cdot \sigma_v \left( s - \frac{k_1 s}{2} \right) \\ & - k_2 \cdot A_t \cdot \sigma_v \left( \frac{k_2 s}{2} \right) - A_r \cdot \sigma_{yr} \left( \frac{t_r}{2} \right) \dots\dots\dots(3-20) \end{aligned}$$

Gaya tarik yang ada:

$$T = T_B = T_T = \left( 1 - k_1 - k_2 \right) \cdot A_t \cdot \sigma_v \dots\dots\dots(3-21)$$

Momen akibat gaya-gaya yang bekerja terhadap garis tengah balok  $\bar{y}$  adalah:

$$T_{\bar{y}} = A_t \cdot \sigma_v \left( 1 - k_2 - k_1 \right) \left[ H + \frac{s}{2} \left( 1 - k_2 - k_1 \right) \right] \dots\dots(3-22)$$

### III.4 Perencanaan Yang Disederhanakan

Sebagaimana diuraikan sebelumnya, ada dua pendekatan yang mungkin dalam merencanakan balok komposit dengan *web openings*, yang menggunakan perkuatan/pengaku, gaya geser ultimit dapat ditentukan dan nilai-nilai yang tepat untuk nilai  $M_s$  dan  $M_{comp}$ . Kekuatan penampang kemudian ditentukan berikutnya untuk nilai-nilai yang tepat dari  $V_h/V_h$  pada lubang. Alternatif lain, diagram interaksi lengkap boleh dibuat dengan nilai-nilai yang lain dari  $V_h/V_h$  dengan perhitungan  $M_s$  dan  $M_{comp}$  untuk meningkatkan nilai-nilai gaya geser pada penampang.

Diagram interaksi ini tidak mempunyai dimensi dalam pembagian  $M_s$  dengan  $M_p$  dan  $V$  dengan  $V_p$  pada suatu balok, dibawah ini dapat ditentukan nilai  $M_p$  dan  $V_p$ :

$$\begin{aligned} M_p &= \sigma_y \cdot Z \\ &= \sigma_y \cdot \left[ A_f \cdot (h - t_f) + 0.25 (h - 2t_f)^2 \cdot t_w \right] \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (3-23)$$

dan

$$V_p = \frac{A_w \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}} = \frac{(h - 2t_f) \cdot t_w \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}} \quad \dots \dots \dots (3-24)$$

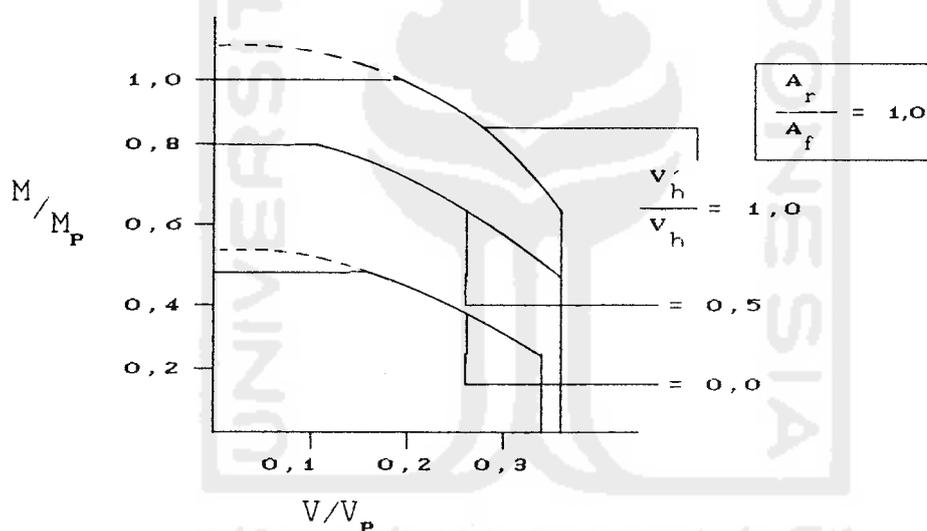
dengan:

$Z$  = modulus penampang plastis.

Studi tentang pengaruh berbagai besaran-besaran pengaku simetris, pada pers. (3-23) dan (3-24) dapat dilihat pada gambar 3.7. Kekuatan batas penampang dengan tambahan perkuatan-perkuatan yang lebih berat pada *web openings* dapat melebihi kekuatan batas utamanya (tanpa

perkuatan). Demikian juga balok komposit dengan tambahan pelat-pelat pengaku pada lubang dapat meningkatkan gaya tarik yang ada, sehingga meningkatkan kekuatan penampang pada lubang dibawah balok komposit (Gambar 3.7a).

Persamaan-persamaan untuk harga  $M_s$ ,  $T$  dan  $M_c$  yang telah diperoleh, terlalu kaku dalam penggunaan perencanaan yang sederhana atau penyelidikan mengenai penambahan lubang pada balok komposit. Bentuk diagram interaksi pada dasarnya tetap konstan diatas daerah variabel  $V/V_p$ , sehingga dianjurkan bahwa bentuk diagram interaksi lebih

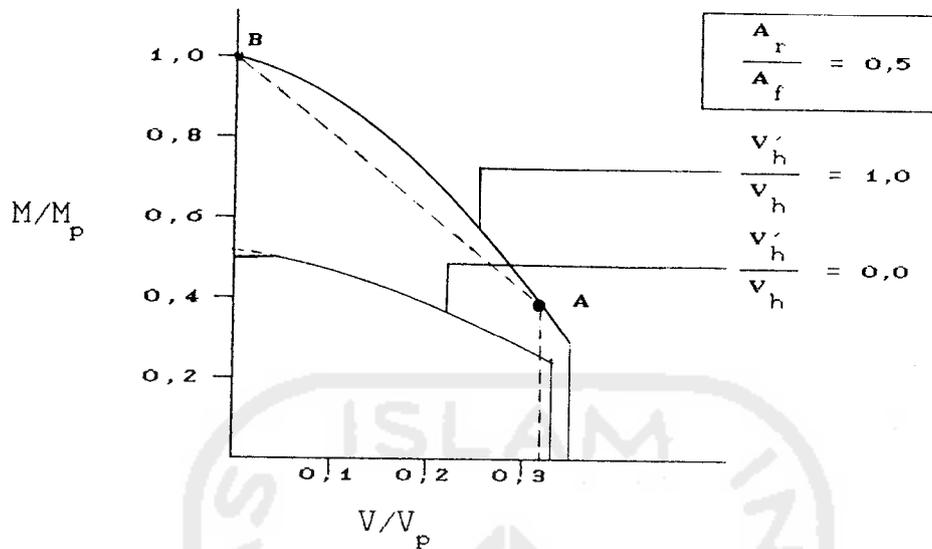


Gambar 3.7a Diagram Interaksi dengan  $A_r/A_f = 1.0$

baik ditunjukkan oleh diagram garis lurus  $M_s/M_p$  yang ditetapkan pada dua titik A dan B (Gambar 3.7b).

Untuk menghasilkan titik tersebut, perlu dicatat bahwa tiap diagram pada gambar 3.7 mempunyai sudut yang jelas dimana harga  $M_s/M_p$  turun menjadi nilai nol. Pemberian sifat-sifat ini menunjukkan perbandingan nilai

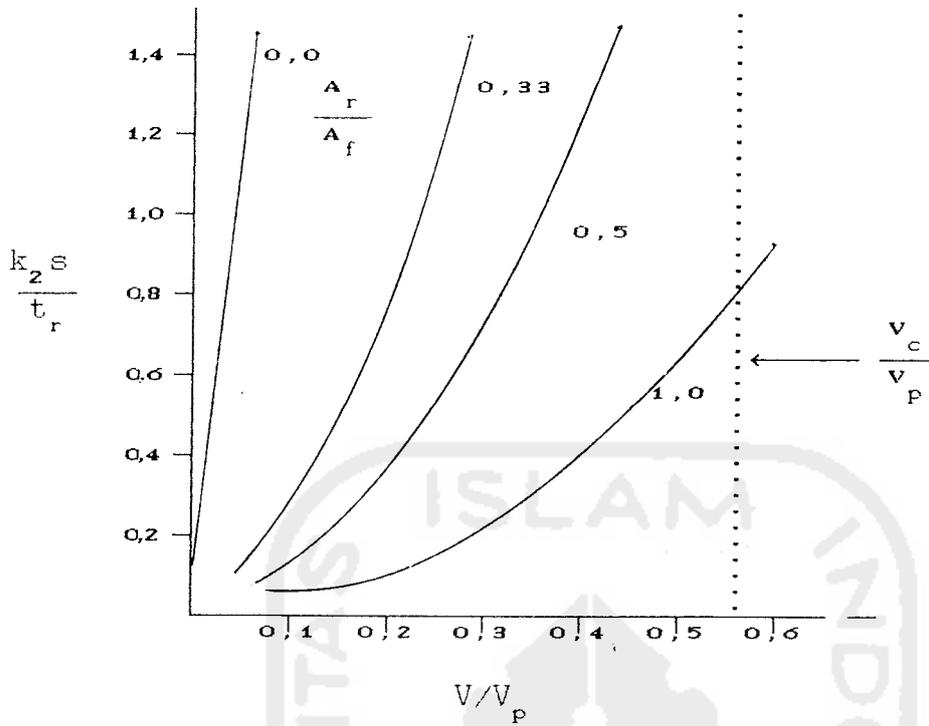




Gambar 3.7b Diagram Interaksi dengan  $A_r/A_f = 0,5$

$\frac{k_2 s}{t_r}$  atau ketinggian momen leleh yang diakibatkan  $M_v$  dalam *stem profil tee* terhadap  $V/V_p$ . Perbandingan tersebut membuat berbagai perbandingan pengaku,  $A_r/A_f$  (Gambar 3.8), terlihat bahwa untuk perbandingan yang lebih besar dari  $1/4$ , bagian sumbu netral plastis dari ketinggian pengaku ke *web stem* penampang *tee* yang diperkuat pada lubang menunjukkan perubahan yang tiba-tiba pada penampang.

Perbandingan hasil-hasil kapasitas momen menunjukkan perubahan bahwa  $V/V_p$  dimana  $k_2 s$  melewati ketinggian pengaku dapat disamakan dengan sudut diagram interaksi. Penggunaan persamaan (3.9-3.14) dirumuskan kembali dengan  $k_2$  fraksi ketebalan pengaku. Pada titik sumbu netral plastis melalui pengaku ke *web stem*  $k_2 s = t_r$ , persamaan



Gambar 3.8 Pengaruh Rasio  $A_r / A_f$

(3-9) dapat dirumuskan menjadi:

$$k_1 = \frac{k_2 \cdot (s \cdot b_r \cdot \sigma_{yr})}{A_f \cdot \sigma_{yf}} = \frac{(t_r \cdot b_r) \sigma_{yr}}{A_f \cdot \sigma_{yf}} = \frac{A_r \cdot \sigma_{yr}}{A_f \cdot \sigma_{yf}} \dots \dots \dots (3-25)$$

nilai diatas disubstitusikan kepersamaan (3-10) dan penyelesaian harga V, memberikan gaya geser kritis sebagai berikut ini.

$$V_c = \left[ 2s - t_r + t_f \cdot \left( 2 - \frac{A_r \cdot \sigma_{yr}}{A_f \cdot \sigma_{yf}} \right) \right] \frac{A_r \cdot \sigma_{yr}}{I} \dots \dots \dots (3-26)$$

Persamaan ini dibandingkan dengan persamaan (3-24)

menjadi:

$$\frac{V_c}{V_p} = \left[ 2s - t_r + t_f \cdot \left( 2 - \frac{A_r \cdot \sigma_{yr}}{A_f \cdot \sigma_{yf}} \right) \right] \frac{A_r \cdot \sqrt{3}}{A_w \cdot I} \dots\dots\dots(3-27)$$

Persamaan (3-11) diatas, dapat ditulis kembali menjadi:

$$T = A_t \cdot \sigma_w + A_f \cdot \sigma_{yf} + A_r \cdot \sigma_{yr} \dots\dots\dots(3-28)$$

untuk persamaan (3-12) dan (3-13) akan ditunjukkan dengan persamaan berikut ini.

$$M_{sc} = A_t \cdot \sigma_w \cdot [s + 2H] + A_f \cdot \sigma_{yf} \cdot [h - t_f] + A_r \cdot \sigma_{yr} \cdot [2H + t_r] \dots\dots\dots(3-29)$$

Dalam kasus penggunaan pengaku dengan perbandingan pengaku  $\pm 1/4$ , mengakibatkan pengaruh sumbu netral plastis yang menyebar pada ketinggian pengaku yang terus berkurang. Dalam perbedaan yang besar tanpa pengaku, pengaruh tersebut tidak ada dan hubungan yang baru harus didapat untuk perencanaan.

Titik sumbu netral plastis melewati dari *web stem* ke bagian flens, perubahan kemiringan kurva menandakan batas dari beberapa kekuatan yang berarti. Jika titik pada  $k_2 = 1,0$  yang digunakan sebagai tanda beban runtuh, persamaan (3-9) menjadi:

$$k_1 = \frac{A_t \cdot \sigma_w}{A_f \cdot \sigma_{yf}} \dots\dots\dots(3-30)$$

Kemudian pernyataan untuk beban runtuh,  $V_c$  dapat ditulis

sebagai berikut ini.

$$V_c = \left[ s + t_f \cdot \left( 2 - \frac{A_t \cdot \sigma_w}{A_f \cdot \sigma_{yf}} \right) \right] \frac{A_t \cdot \sigma_w}{I} \dots\dots\dots(3-31)$$

Catatan bahwa persamaan (3-31) meliputi  $\sigma_w$ , atau tegangan tarik pada *stem* di profil *tee* yang diizinkan, tegangan tersebut merupakan fungsi dari  $V_c$ . Dalam balok tanpa pengaku, gaya-gaya geser pada saat runtuh relatif rendah. Perkiraan yang baik untuk harga  $\sigma_w$  adalah  $0.9 \sigma_y$ . Kapasitas tarik untuk profil *tee* tanpa pengaku pada lubang adalah:

$$T = A_f \cdot \sigma_{yf} + A_t \cdot \sigma_w \dots\dots\dots(3-32)$$

dan kapasitas momen dapat ditulis seperti dibawah ini.

$$M_{sc} = A_f \cdot \sigma_{yf} \cdot (h - t_f) + A_t \cdot \sigma_w \cdot (s + 2H) \dots\dots\dots(3-33)$$

Pada kedua kasus dengan pengaku atau tanpa pengaku ( $A_r=0$ ), kapasitas momen batas pada  $V = 0$ ,  $M_{so}$  dapat dinyatakan dengan rumus dibawah ini.

$$M_{so} = \left[ A_t \cdot (s + 2H) + A_f \cdot (h - t_f) + A_r \cdot (2H + t_r) \right] \sigma_y \dots\dots\dots(3-34)$$

### III.5 Batas-batas Gaya Geser pada Lubang (*openings*)

Lubang-lubang dengan ukuran pengaku sedang atau relatif pendek boleh kuat dalam menahan lentur dari pada gaya geser. Sebagian kapasitas geser penampang hampir mulai hilang mendekati kapasitas tarik pada badan (*web*),

hal ini dihubungkan dengan kriteria leleh dari *Von Mises* pada persamaan (3-6). Jika persamaan tersebut ditentukan nol, diatur kembali syarat-syarat batas geser  $V_m$  dan dibagi dengan persamaan (3-24), yaitu menjadi:

$$V_m = \frac{(h - 2t_f - 2H)t_w \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}}$$

$$V_p = \frac{A_w \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}} = \frac{(h - 2t_f)t_w \cdot \sigma_y}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{2s}{(h - 2t_f)} \dots \dots \dots (3-35)$$

### III.6 Penerapan Pendekatan Diagram Interaksi

Penerapan pendekatan diagram interaksi pada penampang dengan *web openings* dibuat dengan perhitungan elemen sifat pada beban runtuh dan momen geser nol serta hubungannya dengan persamaan (3-5). Pada tiap-tiap beban kritis yang disebutkan diatas, persamaan (3-5) ditafsirkan sebagai berikut ini.

(i) Pada Beban Runtuh

$$M_{tc} = M_{sc} + \left[ \frac{V_h}{V_{hc}} \right]^{1/2} (M_{cc} - M_{sc}) \dots \dots \dots (3-36)$$

dengan:

$M_{tc}$  = Momen komposit total pada keadaan batas,

$M_{sc}$  = Kapasitas momen penampang baja pada lubang dengan gaya geser runtuh,

$M_{cc}$  = Momen komposit penuh pada lubang dengan beban

geser runtuh,

$V'_h$  = Kapasitas geser horizontal yang diperoleh antara ujung balok dengan lubang,

$V_{hc}$  = Kapasitas tarik yang ada pada penampang.

$$= 2(T_c) = F ; \text{ dengan } \frac{V'_h}{V_{hc}} < 1.0$$

jika ;  $\frac{V'_h}{V_{hc}} \geq 1.0$  , maka  $\frac{V'_h}{V_{hc}} = 1.0$

(ii) Pada Momen Geser Nol

$$M_{t_o} = M_{s_o} + \left[ \frac{V'_h}{V_{h_o}} \right]^{1/2} \left[ M_{c_o} - M_{s_o} \right] \dots \dots \dots (3-37)$$

dengan:

$M_{t_o}$  = Momen komposit total pada keadaan gaya geser nol,

$M_{c_o}$  = Momen komposit penuh pada lubang dengan gaya geser nol,

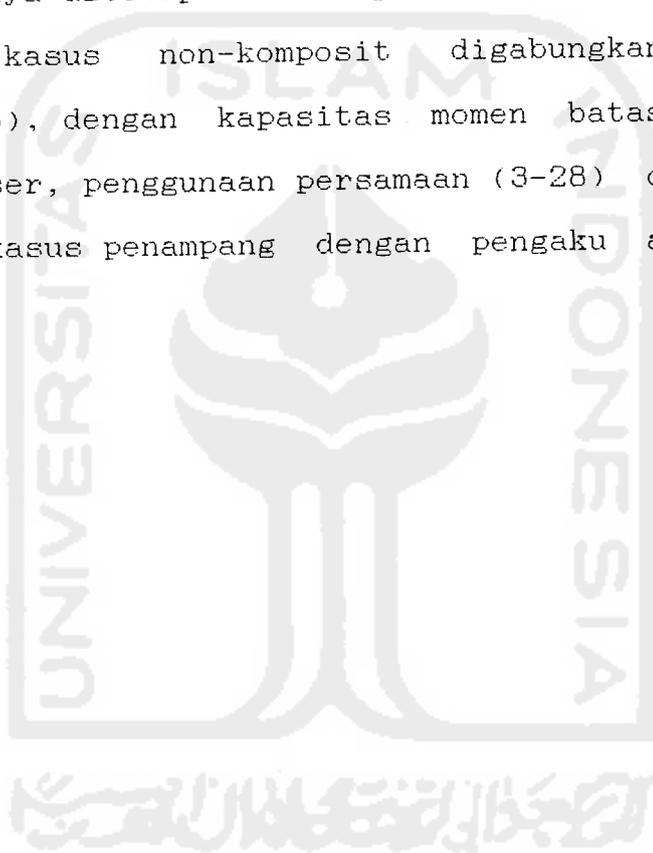
$$V_{h_o} = 2T_c = F$$

= Kapasitas tarik pada penampang dengan  $V = 0$ ,

$$\frac{V'_h}{V_{h_o}} \leq 1.0 .$$

Dengan persamaan-persamaan yang telah disebutkan sebelumnya, dua titik pada diagram interaksi linier dan batas geser untuk balok komposit dan ukuran lubang serta perbandingan pengaku bisa diperoleh balok dengan pengaku yang nilai  $A_r/A_f > 1/4$ , persamaan-persamaan (3-26), (3-29)

dan (3-34) dapat digunakan untuk menetapkan kapasitas momen alternatif tanpa gaya geser dan kapasitas momen batas kritis dengan batas yang sesuai, sedangkan untuk penampang dengan  $A_r/A_f < 1/4$ , persamaan (3-31), (3-33) dan (3-34) boleh digunakan untuk membuat titik-titik yang sama. Kedua kasus tersebut, batas gaya geser penampang dan ukuran lubangnya ditetapkan oleh persamaan (3-35). Batas-batas untuk kasus non-komposit digabungkan melalui persamaan (3-5), dengan kapasitas momen batas komposit tanpa gaya geser, penggunaan persamaan (3-28) dan (3-32) adalah untuk kasus penampang dengan pengaku atau tanpa pengaku.



**BAB IV**  
**PEMBAHASAN**

Perencanaan balok komposit dengan *web openings* yang dipakai untuk balok lantai interior suatu gedung perkantoran. Ini merupakan penerapan dari analisis balok komposit dengan *web openings* yang telah diuraikan pada bab sebelumnya.

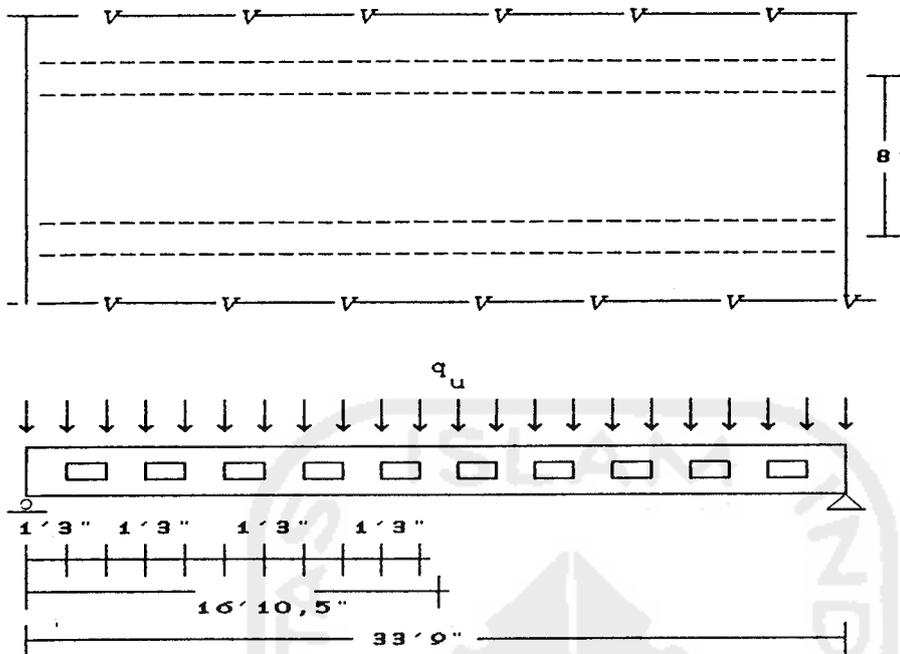
**IV.1 Aplikasi**

Pada perhitungan balok komposit menggunakan spesifikasi AISC. tebal pelat beton 5 inch, dengan  $f'_c = 3000$  psi,  $F_y = 36$  Ksi, bentangan 33,75 ft, jarak antar balok 8,0 ft dan dengan pembebanan-pembebanan berdasarkan PBI 1983 yang dikonversikan kesatuan SI sebagai berikut ini.

Beban	PBI-1983	SI
- Pasir	= 1600 kg/m <sup>3</sup>	100 pcf
- Spesi	= 2200 kg/m <sup>3</sup>	130 pcf
- Tegel	= 24 kg/m <sup>2</sup> / 2,5 cm tebal	12 psf
- Langit-langit	= 18 kg/m <sup>2</sup>	3,7 pef
- Partisi	= 120 kg/m <sup>2</sup>	25 psf
- Beban hidup	= 250 kg/m <sup>2</sup>	51 psf

Balok komposit tersebut direncanakan untuk:

1. Balok komposit dengan *web openings* menggunakan pengaku.
2. Balok komposit dengan *web openings* tanpa pengaku.
3. Balok komposit konvensional.



Gambar 4.1 Pembebanan balok komposit dengan *web openings*

**Perhitungan:**

a. Menghitung  $q_u$

- Plat 5 inch; $5/12 \times 8 \times 0,15$	= 0,5000	kip/ft
- Balok baja (taksiran)	= 0,0260	kip/ft
- Pasir; $0,16 \times 0,10 \times 8$	= 0,1280	kip/ft
- Spesi; $0,07 \times 0,13 \times 8$	= 0,0730	kip/ft
- Tegel; $0,012 \times 8$	= 0,0960	kip/ft
- Langit-langit; $0,0037 \times 8$	= 0,0296	kip/ft
	<hr/>	
	$q_D$	= 0,8476 kip/ft

- Beban hidup; $0,051 \times 8$	= 0,4080	kip/ft
- Partisi ; $0,025 \times 8$	= 0,2000	kip/ft
	<hr/>	
	$q_L$	= 0,6080 kip/ft

$$\begin{aligned}
 q_u &= 1,2q_D + 1,6q_L \\
 &= 1,2 \times 0,8476 + 1,6 \times 0,6080 = 1,99 \text{ kip/ft}
 \end{aligned}$$

b. Momen ditengah bentangan

$$\begin{aligned}
 - M_u &= 1/8 \times q_u \times l^2 \\
 &= 1/8 \times 1,99 \times 33,75^2 = 283,3418 \text{ ft-kips} \\
 - R &= 1/2 \times q_u \times l \\
 &= 1/2 \times 1,99 \times 33,75 = 33,5812 \text{ kips}
 \end{aligned}$$

c. Momen pada lubang yang terdekat dengan momen maksimum ( $x = 15,625 \text{ ft}$ )

$$\begin{aligned}
 - M_u \text{ pada lubang} &= R(x) - 1/2(q_u)(x)^2 \\
 &= 33,5812 \times 15,625 - 1/2 \times 1,99 \times 15,625^2 \\
 &= 281,7863 \text{ ft-kips} \\
 - V_u \text{ pada lubang} &= R - (q_u)(x) \\
 &= 33,5812 - 1,99 \times 15,625 = 2,4874 \text{ kips}
 \end{aligned}$$

d. Gaya lintang pada sisi lubang yang terdekat dengan tumpuan ( $x = 1,25 \text{ ft}$ )

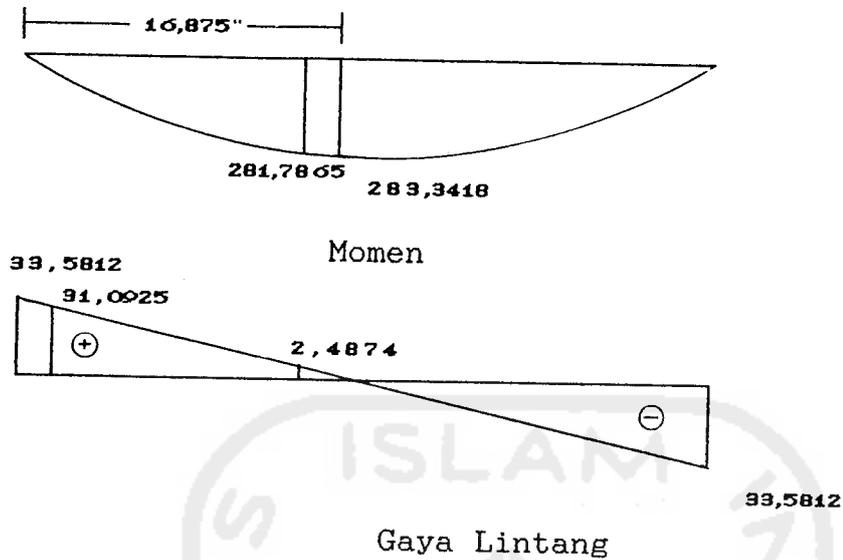
$$\begin{aligned}
 - V_u &= R - (q_u)(x) \\
 &= 33,5812 - 1,99 \times 1,25 = 31,0925 \text{ kips}
 \end{aligned}$$

e. Dicoba profil W12x26

$$\begin{aligned}
 A_g &= 7,65 \text{ inch}^2 & ; & t_f = 0,380 \text{ inch} \\
 d &= 12,22 \text{ inch} & ; & I_x = 204,000 \text{ inch}^4 \\
 t_w &= 0,230 \text{ inch} & ; & S_x = 33,400 \text{ inch}^3 \\
 b_f &= 6,490 \text{ inch} & ; & A_f = 2,470 \text{ inch}^2
 \end{aligned}$$

f. Dicoba pengaku:

$$\begin{aligned}
 b_r &= 1,40 \text{ inch} & ; & A_r = 0,84 \text{ inch}^2 \\
 t_r &= 0,60 \text{ inch} & ; & A_t = 1,29 \text{ inch}^2
 \end{aligned}$$



Gambar 4.2 Momen dan gaya lintang

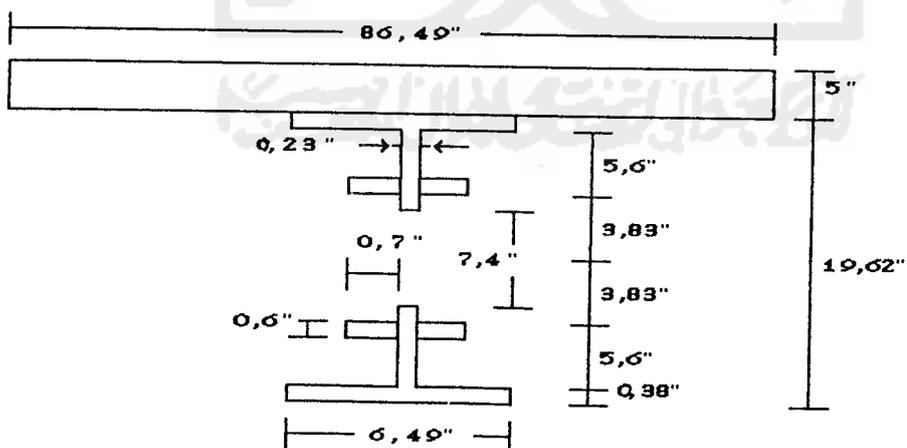
g. Menghitung  $b$  efektif ( $b_E$ ):

$$b_E \leq L/4 = 33,75 \times 12/4 = 101,25 \text{ inch}$$

$$\leq b_o = 8 \times 12 = 96 \text{ inch}$$

$$\leq b_f + 16 t_b = 6,49 + 16 \times 5 = 86,49 \text{ inch}$$

$$\text{dipakai } b_E = 86,49 \text{ inch}$$



Gambar 4.3 Tampang melintang profil W12x26

**IV.1.1 Perhitungan balok komposit dengan web openings dengan menggunakan pengaku.**

1. Pemeriksaan batas-batas gaya geser pada lubang (*opening*) dengan rumus (3-35).

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{2s}{h - 2t_f} = \frac{2 \times 5,6}{19,62 - 2 \times 0,380} = 0,59$$

$$\begin{aligned} V_p &= \frac{(h - 2t_f)(t_w)(\sigma_y)}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{(19,62 - 2 \times 0,380)(0,230)(36)}{\sqrt{3}} = 90,16 \text{ kips} \end{aligned}$$

Untuk  $V_u = 2,4862$  kips

$$\frac{V_u}{V_p} = \frac{2,4862}{90,16} = 0,028 < 0,59$$

Untuk  $V_u = 31,0925$  kips

$$\frac{V_u}{V_p} = \frac{31,0925}{90,16} = 0,345 < 0,59 \dots\dots\dots \text{Ok}$$

2. Menghitung kapasitas momen pada kasus geser runtuh.

- a. menghitung gaya geser runtuh dengan rumus (3-26).

$$\begin{aligned} V_c &= 2 \left[ 2s - t_r + t_f \left( 2 - \frac{A_r \cdot \sigma_{yr}}{A_f \cdot \sigma_{yf}} \right) \right] \frac{A_r \cdot \sigma_{yr}}{1} \\ &= 2 \left[ 2(2,56) - 0,6 + 0,38 \left( 2 - \frac{0,84(36)}{2,47(36)} \right) \right] \frac{0,84(36)}{7,4} \\ &= 91,789 \text{ kips} \end{aligned}$$

$$\phi V_c = 0,85 \times 91,789 = 78,02 \text{ kips} > V_u = 31,09 \text{ kips} \dots\dots\dots \text{Ok}$$

- b. Tegangan tarik web yang diizinkan dari persamaan (3-6) dan (3-7).

$$\begin{aligned}\sigma_v &= \sqrt{\sigma_y^2 - 3\tau^2} \\ &= \sqrt{(36)^2 - 3\left[\frac{78,02}{2 \times 5,6 \times 0,23}\right]^2} \\ &= 35,77 \text{ Ksi}\end{aligned}$$

- c. Kapasitas tarik pada saat kritis dengan rumus (3-28).

$$\begin{aligned}T &= A_t \cdot \sigma_v + A_f \cdot \sigma_{yf} + A_r \cdot \sigma_{yr} \\ &= (1,29)(35,77) + (2,47)(36) + (0,84)(36) \\ &= 165,29 \text{ kips.}\end{aligned}$$

$$2T = 330,58 \text{ kips.}$$

- d. Kapasitas momen penampang baja komposit (3-29).

$$\begin{aligned}M_{sc} &= A_t \cdot \sigma_v [s + 2H] + A_f \cdot \sigma_{yf} [h - t_f] \\ &\quad + A_r \cdot \sigma_{yr} [2H + t_r] \\ &= 1,29(35,77) [5,6 + 2(3,83)] + 2,47(36)(19,62 - \\ &\quad 0,380) + 0,84(36) [2(3,83) + 0,6] \\ M_{sc} &= 2572,46 \text{ in-kips} \\ &= 214,37 \text{ ft-kips}\end{aligned}$$

3. Kapasitas momen dengan komposit penuh.

$$M_{cc} = M_{comp} = F \cdot z$$

$$F = 2T = 2(165,29) = 330,58 \text{ kips}$$

$$a = \frac{2T}{0,85(f_c')(b)} = \frac{330,58}{0,85(3)(86,49)} = 1,50 \text{ inch}$$

$$z = h/2 + h_f - a/2$$

$$= 19,62/2 + 5 - 1,50/2 = 13,56 \text{ inch}$$

$$M_{cc} = 330,58 \times 13,56 = 4482,68 \text{ in-kips}$$

$$= 373,56 \text{ ft-kips}$$

- Menghitung kebutuhan *Shear Connector*.

$$V_s = 2T = 330,58 \text{ kips}$$

$$V_c = 0,85 \times 3 \times (86,49 \times 5) = 1102,75 \text{ kips}$$

Dipakai Stud bengkok atau berkepala 2,5" dengan diameter 5/8",  $q = 8 \text{ kips}$  (satu penghubung geser), tabel 2.1a.

- cek;  $5/8 \leq 2,5 t_f = 2,5 \times 0,595 = 1,49 \dots \text{Ok}$

Banyak *Shear connector* yang digunakan adalah:

$$n = \frac{330,58}{8} = 41,32 \longrightarrow \text{dipakai 42 stud}$$

Jadi kapasitas *Shear Connector* =  $42 \times 8 = 336 \text{ kips}$

4. Kapasitas momen penampang baja dengan gaya geser  $V = 0$  (3-34).

$$\begin{aligned} \text{a. } T_o &= (A_t + A_f + A_r) \cdot \sigma_y \\ &= (1,29 + 2,47 + 0,84)36 \\ &= 165,60 \text{ kips.} \end{aligned}$$

$$2T_o = 331,20 \text{ kips.}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } M_{so} &= [A_t(s + 2H) + A_f(h - t_f) + A_r(2H + t_r)] \sigma_y \\ &= [1,29(5,6 + 2 \times 3,83 + 2,47(19,62 - 0,380) \\ &\quad + 0,84(2 \times 3,83 + 0,6))] 36 \\ &= 2576,40 \text{ in-kips} = 214,70 \text{ ft-kips} \end{aligned}$$

5. Kapasitas momen komposit penuh dengan gaya geser  $V = 0$ .

$$M_{co} = F \cdot z$$

$$F = 2T_o = 2(165,60) = 331,20 \text{ kips}$$

$$a = \frac{2T_o}{0,85(f'_c)(b)} = \frac{331,20}{0,85(3)(86,49)} = 1,50 \text{ inch}$$

$$z = h/2 + h_f - a/2 = 19,62/2 + 5 - 1,50/2 \\ = 14,06 \text{ inch}$$

$$M_{co} = 331,20 \times 14,06 = 4656,39 \text{ in-kips} \\ = 338,03 \text{ ft-kips}$$

6. Kapasitas komposit pada lubang dianggap bahwa distribusi kapasitas penghubung geser (*shear connector*) adalah seragam.

$$V'_h = 2T$$

$$V'_h = 2 \times 165,29 = 330,58 \text{ kips}$$

$$V'_h \text{ pada lubang adalah} = 1,25/16,875 \times 330,58 = 24,49 \text{ kips}$$

$$V_{hc} = 330,58 \text{ kips}$$

Momen komposit total pada keadaan batas dengan menggunakan rumus (3-36) adalah sebagai berikut:

$$M_{tc} = M_{sc} + \left( \frac{V'_h}{V_{hc}} \right)^{1/2} \cdot (M_{cc} - M_{sc})$$

$$M_{tc} = 214,37 + \left[ \frac{24,49}{330,58} \right]^{1/2} (373,56 - 214,37)$$

$$= 257,61 \text{ ft-kips}$$

7. Momen komposit total pada keadaan gaya geser  $V = 0$  menggunakan rumus (3-37) adalah:

$$M_{t_o} = M_{s_o} + \left[ \frac{V_h}{V_{h_o}} \right]^{1/2} \cdot (M_{c_o} - M_{s_o})$$

$$V_{h_o} = F = 2T_o = 331,20 \text{ kips}$$

$$\begin{aligned} M_{t_o} &= 214,70 + \left[ \frac{24,49}{331,20} \right]^{1/2} \cdot (338,03 - 214,70) \\ &= 261,83 \text{ ft-kips} \end{aligned}$$

8. Pemeriksaan kapasitas momen pada  $V_u = 2,49$  kips, dengan interpolasi linier.

$$\begin{aligned} M_{t_u} &= M_{t_c} + \left[ \frac{V_o - V_u}{V_o - V_c} \right] (M_{t_o} - M_{t_c}) \\ &= 257,61 + \left[ \frac{0 - 2,49}{0 - 78,02} \right] \cdot (261,83 - 257,61) \\ &= 390,16 \text{ ft-kips} \end{aligned}$$

$$\phi M_{t_u} = 0,85 \times 390,16 = 331,63 \text{ ft-kips}$$

$$M_u \text{ pada lubang} = 281,73 \text{ ft-kips}$$

$$\text{Jadi } \phi M_{t_u} > M_u \dots\dots\dots \text{Ok.!!}$$

9. Menghitung defleksi

- a. Rasio moduler; n

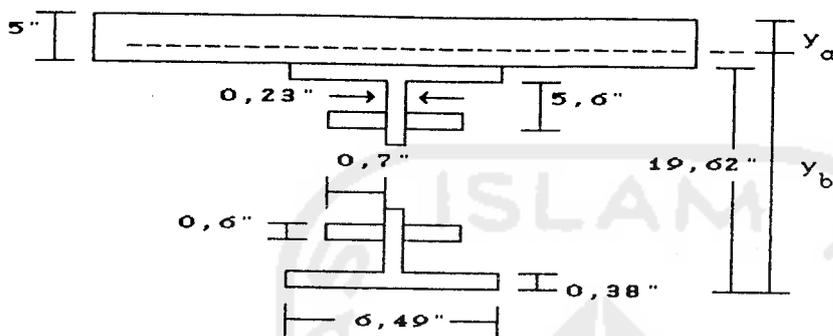
$$\begin{aligned} E_c &= w^{1,5} \cdot 33 \sqrt{f_c'} \\ &= (145^{1,5} \times 33 \sqrt{3000}) / 1000 = 3156 \text{ Ksi} \end{aligned}$$

$$E_s = 29000 \text{ Ksi}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{29000}{3156} = 9,18 \longrightarrow \text{dipakai } n = 9$$

$$b_E/n = 86,49/9 = 9,61 \text{ inch}$$

$$A_c = 9,61 \times 5 = 48,05 \text{ inch}^2$$



Gambar 4.4 Tampang melintang profil W12x26

$\Sigma$  Momen dari bawah profil baja.

$$y_b = \frac{(9,27)(9,81) + (9,61)(5)(22,12)}{9,27 + (9,61)(5)} = 20,13 \text{ inch}$$

$$\begin{aligned} I_x &= \left[ \left( \frac{1}{12} \times 6,49 \times (19,62)^3 \right) - \left( \frac{1}{12} \times 6,26 \times (18,86)^3 \right) \right. \\ &\quad - \left[ \frac{1}{12} \times 0,23 \times (7,4)^3 \right] + 2 \left[ \left( \frac{1}{12} \times 1,4 \times (0,6)^3 \right) \right. \\ &\quad \left. \left. + (1,4 \times 0,6 \times (4,13)^2) \right] \right] \\ &= 606,04 \text{ inch}^4 \end{aligned}$$

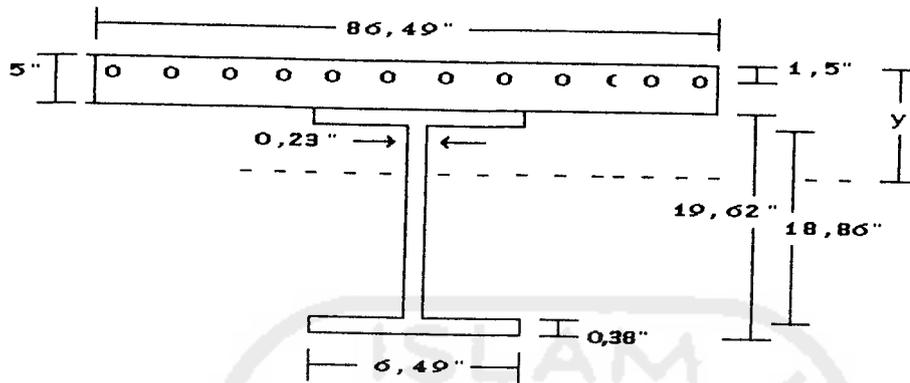
$$\begin{aligned} I_{comp} &= 606,04 + 9,27(10,32)^2 + \frac{1}{12}(9,61)(4,49)^3 + \\ &\quad (9,61)(4,49)(2,25)^2 \\ &= 1884,25 \text{ inch}^4 \end{aligned}$$

$$\Delta_{comp} = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{comp}} = \frac{5(1,456/12)(33,75 \times 12)^4}{384 \times 29000 \times 1884,25}$$

$$= 0,78 \text{ inch}$$

$$\Delta < L/360 = (33,75 \times 12)/360 = 1,125 \text{ inch} \dots\dots\dots \text{Ok.}$$

10. Menghitung sifat-sifat penampang pada tumpuan (momen negatif,  $M_u^- = 1/3 M_u^+$ ).



Dipakai tulangan 12 x Ø1/2" pada slab beton.

$$I_o = [1/12 \times 6,49 \times (19,62)^3] - [1/12 \times 6,26 \times (18,86)^3]$$

$$= 585,10 \text{ inch}^4.$$

	Luas A (inch <sup>4</sup> )	Lgn. Momen dr atas, y (inch)	Ay (inch <sup>3</sup> )	Ay <sup>2</sup> (inch <sup>4</sup> )	I <sub>o</sub> (inch <sup>4</sup> )
Tul. Ø1/2" (A <sub>s</sub> = C, 20)	2,4	1,5	3,60	5,40	-
Profil	9,27	14,81	137,29	2033,25	585,10
			140,89	2038,65	585,10
					I <sub>o</sub> = 2623,75

$$\bar{y}_{atas} = \frac{140,89}{11,67} = 12,45 \text{ inch}$$

$$I = 2623,75 - 11,67(12,45)^2 = 875,97 \text{ inch}^4$$

$$S_{tr} = \frac{875,97}{12,17} = 71,98 \text{ inch}^3$$

$$f_b = \frac{M_u^-}{S_{tr}} = \frac{1/3 M_u^+}{S_{tr}}$$

$$= \frac{1/3(283,3418)(12)}{71,98} = 15,75 \text{ Ksi}$$

$$f_b = 15,75 \text{ Ksi} < F_b = 24 \text{ Ksi} \dots\dots\dots\text{Ok.}$$

11. Menghitung kapasitas las.

a). Kapasitas las pada badan (*web*).

Digunakan las *Groove*,  $F_y = 60 \text{ Ksi}$ ,  $t_e = 0,23 \text{ inch}$



$$R_{nw} = \phi \cdot t_e \cdot (0,6 \cdot F_y)$$

$$= 0,75(0,23)(0,6 \times 60) = 6,21 \text{ Ksi/inch}$$

Panjang las,  $l = V/R_{nw}$

$$= 33,58/6,41 = 5,41 \text{ inch}$$

di pakai panjang las = 5,5 inch.

Gaya geser yang harus di tahan, R.

$$R = \frac{V \cdot S}{I} ; \quad V = 33,58 \text{ Kips}$$

$$S = (6,49)(0,38)(9,62) + (9,43)(0,23)$$

$$(9,43/2) = 33,95 \text{ inch}^3$$

$$I = 585,10 \text{ inch}^4$$

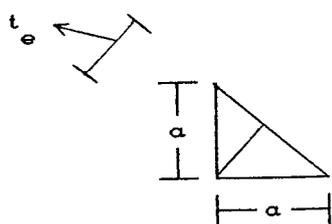
$$R = \frac{33,58 \times 33,95}{585,10} = 1,95 \text{ Kips/inch}$$

$$R_{nw} = 6,21 \text{ Kips/inch} > R = 1,95 \text{ Kips/inch} \dots\dots\text{Ok.}$$

b). Kapasitas las pada pengaku.

Digunakan las *Fillet*,  $F_y = 60 \text{ Ksi}$ ,  $a = 0,20 \text{ inch}$

$$R_{nw} = \phi \cdot 2 \cdot 0,707 \cdot a \cdot (0,6 \cdot F_y)$$



$$R_{nv} = 0,75(2)(0,707)(0,2)(0,6 \times 60) \\ = 7,6 \text{ Kips/inch}$$

Panjang las,  $l = V/R_{nv} = 31,09/7,6 = 4 \text{ inch}$

Gaya geser yang harus ditahan, R.

$$R = \frac{V \cdot S}{I} \quad ; \quad V = 31,09 \text{ Kips} \\ S = (6,49)(0,38)(9,62) + (5,6)(0,23) \\ (6,63) + (1,4)(0,6)(4,13) \\ = 35,73 \text{ inch}^3 \\ I = 606,04 \text{ inch}^4$$

$$R = \frac{31,09 \times 35,73}{606,04} = 1,83 \text{ Kips/inch}$$

$$R_{nv} = 7,6 \text{ Kips/inch} > R = 1,83 \text{ Kips/inch}$$

.....Ok.

#### IV.1.2 Perhitungan balok komposit dengan web openings tanpa menggunakan pengaku.

1. Menghitung  $V_c$  dengan menggunakan rumus (3-31):

$$\sigma = 0,9 \sigma_y = 0,9 \times 36 = 32,4 \text{ ksi}$$

$$V_c = 2 \left[ s + t_f \left( 2 - \frac{A_t \cdot \sigma_v}{A_f \cdot \sigma_{yf}} \right) \right] \frac{A_t \cdot \sigma_v}{I}$$

$$V_c = 2 \left[ 5,73 + 0,380 \left( 2 - \frac{1,32 \times 32,4}{2,47 \times 36} \right) \right] \frac{1,32 \times 32,4}{7,4}$$

$$= 72,90 \text{ kips.}$$

$$\phi V_c = 0,85 \times 72,90 = 61,97 \text{ kips} > V_u = 31,09 \text{ kips}$$

.....Ok

2. Kapasitas tarik pada saat runtuh rumus (3-32) :

$$T = A_t \cdot \sigma_v + A_f \cdot \sigma_{yf}$$

$$= 1,32(32,4) + 2,47(36) = 131,69 \text{ kips}$$

$$2T = 263,38 \text{ Kips}$$

3. Kapasitas momen penampang baja komposit rumus (3-33)

$$M_{sc} = A_t \cdot \sigma_v (s + 2H) + A_f \cdot \sigma_{yf} (h - t_f)$$

$$M_{sc} = 1,32(32,4) [5,73 + 2(3,70)] + 2,47(36)(19,62 - 0,380) = 2282,480 \text{ in-kips}$$

$$= 190,24 \text{ ft-kips}$$

4. Kapasitas momen dengan komposit penuh:

$$M_{cc} = F \cdot z$$

$$F = 2T = 2 \times 131,69 = 263,38 \text{ kips}$$

$$a = \frac{2T}{0,85 (f'_c)(b)} = \frac{263,38}{0,85(3)(86,49)} = 1,19 \text{ inch}$$

$$z = 19,62/2 + 5 - 1,19/2 = 14,22 \text{ inch}$$

$$M_{cc} = 263,38 \times 14,22 = 3743,39 \text{ in-kips}$$

$$= 311,95 \text{ ft-kips}$$

5. Kapasitas momen dengan gaya geser  $V = 0$ , (3-34)

$$T_o = (A_t + A_f) \cdot \sigma_y$$

$$T_o = (1,32 + 2,47)36 = 136,44 \text{ kips}$$

$$2T_o = 272,88 \text{ Kips}$$

$$M_{s_o} = \left[ A_t \left[ s + 2H \right] + A_f \left[ h - t_f \right] \right] \sigma_y$$

$$= \left[ 1,32(5,73 + 2(3,70)) + 2,47(19,62 - 0,380) \right] 36$$

$$M_{s_o} = 2334,76 \text{ in-kips} = 194,56 \text{ ft-kips}$$

6. Kapasitas momen komposit penuh dengan gaya geser  $V = 0$

$$M_{c_o} = F \cdot z$$

$$F = 2T_o = 272,88 \text{ kips}$$

$$a = \frac{272,88}{0,85 \times 3 \times 86,49} = 1,24 \text{ inch}$$

$$z = 19,62/2 + 5 - 1,24/2 = 14,20 \text{ inch}$$

$$M_{c_o} = 272,88 \times 14,20 = 3874,89 \text{ in-kips}$$

$$= 322,91 \text{ ft-kips}$$

7. Kapasitas momen komposit pada lubang dianggap bahwa distribusi kapasitas penghubung geser (*shear connector*) adalah seragam.

$$V'_h = 263,88 \text{ kips}$$

$$V'_h \text{ pada lubang adalah} = 1,25/16,875 \times 263,88$$

$$= 19,55 \text{ kips}$$

$$V_{hc} = 263,88 \text{ kips}$$

$$M_{tc} = M_{sc} + \left[ \frac{V'_h}{V_{ho}} \right]^{1/2} \cdot (M_{cc} - M_{sc})$$

$$M_{tc} = 190,29 + \left[ \frac{19,55}{263,88} \right]^{1/2} \cdot (311,95 - 190,29)$$

$$= 223,40 \text{ ft-kips}$$

8. Momen komposit total pada keadaan gaya geser  $V = 0$ , menggunakan rumus (3-37):



$$I_{\text{comp}} = 577,34 + 7,65(10,63)^2 + 1/12(9,61)(4,18)^3 \\ + 9,61(4,18)(2,09)^2 = 1675,72 \text{ inch}^4$$

$$\Delta = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5(1,456/12)(33,75 \times 12)^4}{384 \times 29000 \times 1675,72} = 0,87 \text{ inch}$$

$$\Delta < L/360 = 1,125 \text{ inch} \dots\dots\dots \text{Ok.}$$

#### IV.1.3 Perhitungan balok komposit konvensional dengan menggunakan profil W12x26.

1. Menghitung a (menentukan letak garis netral).

$$a = \frac{A_s \cdot F_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_E} = \frac{7,65 \times 36}{0,85(3)(86,49)} = 1,25 \text{ inch} < 5 \text{ inch}$$

—————> garis netral pada pelat beton

$$z = h/2 + h_c - a/2 = 12,22/2 + 5 - 1,25/2 \\ = 10,49 \text{ inch}$$

2. Menghitung kapasitas momen balok komposit

$$T = A_s \cdot F_y = 7,65 \times 36 = 275,40 \text{ kips}$$

$$M_n = T \cdot z = 275,40 \times 10,49$$

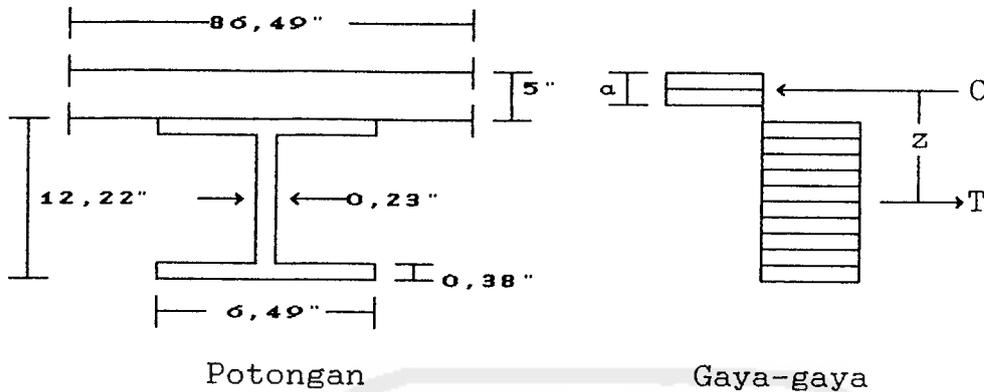
$$= 2887,60 \text{ in-kip}$$

$$= 240,63 \text{ ft-kips}$$

$$\phi M_n = 0,85 \times 240,63 = 204,54 \text{ ft-kips}$$

$$\phi M_n < M_u = 283,34 \text{ ft-kips}$$

—————> profil tidak aman



Gambar IV.6 Tampang balok komposit dan gaya-gaya

### 3. Cek momen geser

$$\begin{aligned} V_c &= 0,6 \cdot F_y \cdot A_v \\ &= 0,6 \times 36 \times 12,22 \times 0,23 \\ &= 60,71 \text{ kips} \end{aligned}$$

$$\phi V_c = 0,85 \times 60,71 = 51,60 \text{ kips}$$

$$\phi V_c = 51,60 \text{ kips} > V_u = 31,09 \text{ kips} \dots\dots\dots \text{Ok.}$$

### 4. Menghitung defleksi

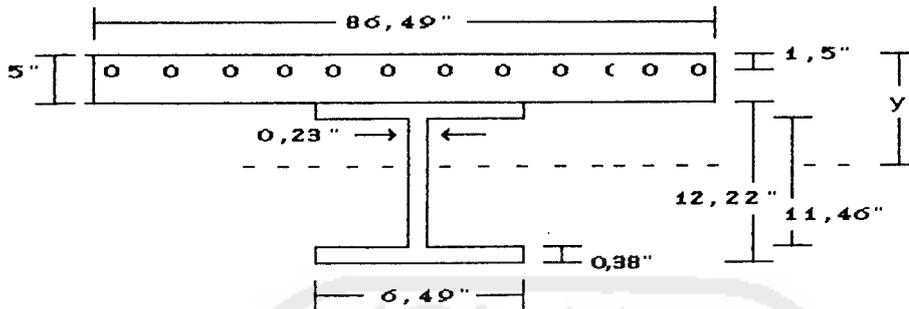
$$y_b = \frac{(7,65)(6,11) + (9,61)(5)(14,72)}{7,65 + (9,61)(5)} = 13,54 \text{ inch}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{comp}} &= 204 + 7,65(7,43)^2 + 1/12(9,61)(3,68)^3 \\ &\quad + 35,36(1,84)^2 \\ &= 785,96 \text{ inch}^4 \end{aligned}$$

$$\Delta = \frac{5(1,460/12)(33,75 \times 12)^4}{384 \times 29000 \times 785,96} = 1,87 \text{ inch}$$

$$\Delta < L/360 = 1,125 \text{ inch} \dots\dots\dots \text{tidak aman!}$$

5. Menghitung sifat-sifat penampang pada tumpuan (momen negatif,  $M_u^- = M_u^+$ ).



Dipakai tulangan 12 x  $\emptyset 1/2$ " pada slab beton.

	Luas A (inch <sup>4</sup> )	Lgn. Momen dr atas, y (inch)	Ay (inch <sup>3</sup> )	Ay <sup>2</sup> (inch <sup>4</sup> )	I <sub>o</sub> (inch <sup>4</sup> )
Tul. $\emptyset 1/2$ " (A = C, 20) S	2,4	1,5	3,60	5,40	-
Profil	7,65	11,11	84,99	944,26	204,00
			88,59	949,66	
				204,00	
					I <sub>o</sub> = 1153,66

$$\bar{y}_{atas} = \frac{88,59}{10,05} = 7,82 \text{ inch}$$

$$I = 1153,66 - 10,05(8,82)^2 = 350,13 \text{ inch}^4$$

$$S_{tr} = \frac{350,13}{8,40} = 43,23 \text{ inch}^3$$

$$f_b = \frac{M_u^-}{S_{tr}} = \frac{1/3 M_u^+}{S_{tr}}$$

$$= \frac{1/3(283,3418)(12)}{43,23} = 26,22 \text{ Ksi}$$

$$f_b = 26,22 \text{ Ksi} < F_b = 24 \text{ Ksi} \dots\dots\dots \text{Ok.}$$

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Balok Komposit

Notasi	Balok komposit dengan <i>web openings</i>		Balok komposit konvensional (3)
	dengan pengaku (1)	tanpa pengaku (2)	
$V_c$	78,62	61,97	51,60
2T	330,58	263,38	275,40
$M_{sc}$	214,37	190,24	---
$M_{cc}$	373,56	311,95	---
$2T_o$	331,20	272,88	---
$M_{so}$	214,70	194,56	---
$M_{co}$	388,03	322,91	---
$M_{tc}$	257,61	223,40	---
$M_{to}$	261,83	229,49	---
$M_{tu}$	331,63	190,09	204,54
$\Delta$	0,78	0,87	1,86

#### IV.2 Kesimpulan perhitungan

Dari hasil perhitungan balok komposit dengan *web openings* menggunakan pengaku, tanpa pengaku dan balok komposit konvensional diatas, dapat di buat kesimpulan sebagai berikut ini.

- 1.a. Kapasitas gaya geser balok komposit dengan *web openings* dengan menggunakan pengaku,  $V_{c_1} = 78,62$  kips
- b. Kapasitas gaya geser balok komposit dengan *web openings* tanpa pengaku,  $V_{c_2} = 61,97$  kips
- c. Kapasitas gaya geser untuk balok tanpa *web openings* (konvensional),  $V_{c_3} = 51,60$  kips

Menghasilkan perbandingan gaya geser;  $V_{c_1} > V_{c_2} > V_{c_3}$

- 2.a. Kapasitas tarik baja untuk balok komposit dengan *web openings* menggunakan pengaku,  $T_1 = 330,58$  kips
- b. Kapasitas tarik baja untuk balok komposit dengan *web openings* tanpa pengaku,  $T_2 = 263,38$  kips
- c. Kapasitas tarik baja untuk balok komposit konvensional  
 $T_3 = 275,40$  kips

Dari ke tiga perhitungan kapasitas tarik baja di atas, maka;  $T_1 > T_3 > T_2$ , disini  $T_3 > T_2$  terjadi karena pada perhitungan kapasitas tarik baja untuk balok komposit dengan *web openings* tanpa pengaku, luasan penampang profil baja pada badan dikalikan dengan tegangan tarik  $\sigma_w = 0,9\sigma_y$  (gaya-gaya geser pada saat runtuh relatif rendah).

- 3.a. Kapasitas momen balok komposit dengan *web openings* menggunakan pengaku,  $M_{tu_1} = 331,63$  ft-kips
- b. Kapasitas momen balok komposit dengan *web openings* tanpa pengaku,  $M_{tu_2} = 190,09$  ft-kips
- c. Kapasitas momen balok komposit konvensional,  $M_n = 204,54$  ft-kips

Dari ketiga perhitungan kapasitas momen di atas;

$M_{tu_1} > M_n > M_{tu_2}$ , pada kapasitas momen untuk  $M_{tu_1}$  dan  $M_{tu_2}$  momen di hitung pada daerah terlemah yaitu pada daerah *web openings* yang terdekat dengan tengah bentangan. Sedangkan  $M_n$  di hitung pada momen terbesar akibat dari pembebanan, yaitu di tengah bentangan.

- 4.a. Difleksi yang terjadi pada balok komposit dengan *web*

- openings* dengan menggunakan pengaku,  $\Delta_1 = 0,78$  inch.
- b. Difleksi yang terjadi pada balok komposit dengan *web openings* tanpa pengaku,  $\Delta_2 = 0,87$  inch.
- c. Difleksi yang terjadi pada balok komposit tanpa *web openings*,  $\Delta_3 = 1,86$  inch.

Dari ketiga perhitungan difleksi di atas,  $\Delta_1 < \Delta_2 < \Delta_3$  terbaca bahwa dengan adanya penambahan tinggi profil baja berpengaruh pada difleksi yang terjadi. Dari hasil perhitungan terlihat bahwa dengan penambahan tinggi profil baja, defleksi dapat diperkecil.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### V.1 Kesimpulan

Penggunaan balok komposit dengan *web openings* akan menghasilkan balok yang lebih tinggi. Jika ditinjau dari segi struktur akan menambah kekuatan dan kekakuan.

Hai ini dapat dilihat dari analisis perhitungan balok komposit dengan menggunakan profil W12x26 dengan panjang bentangan 33,75', jarak antar balok 8' dan tebal pelat beton 5" diperoleh sebagai berikut ini.

1. Balok komposit dengan *web openings* akan efektif bila digunakan pengaku.
2. Balok komposit dengan *web openings* berukuran 7.4" x 14,8" dengan menggunakan pengaku (tanpa memperhitungkan kekompakan penampang profil) menghasilkan:
  - a. kapasitas momen meningkat sebesar 62 %.
  - b. kapasitas geser tampang meningkat sebesar 52 %.
  - c. defleksi dapat berkurang sampai 58 %.

#### V.2 Saran

Penggunaan balok komposit dengan *web openings* sebaiknya diberi perkuatan. Karena keruntuhan yang diakibatkan gaya geser ditentukan oleh luasan badan, maka disarankan penggunaan pengaku  $A_r \leq 0,25 A_f$ , agar dapat menghemat penggunaan profil baja.

Balok komposit dengan *web openings* membutuhkan penyambungan (las) dengan ketelitian dan pengawasan khusus, untuk pengelasan pada *web* dan pengaku.

Pada penambahan tinggi profil diperhitungkan kekompakan penampang.



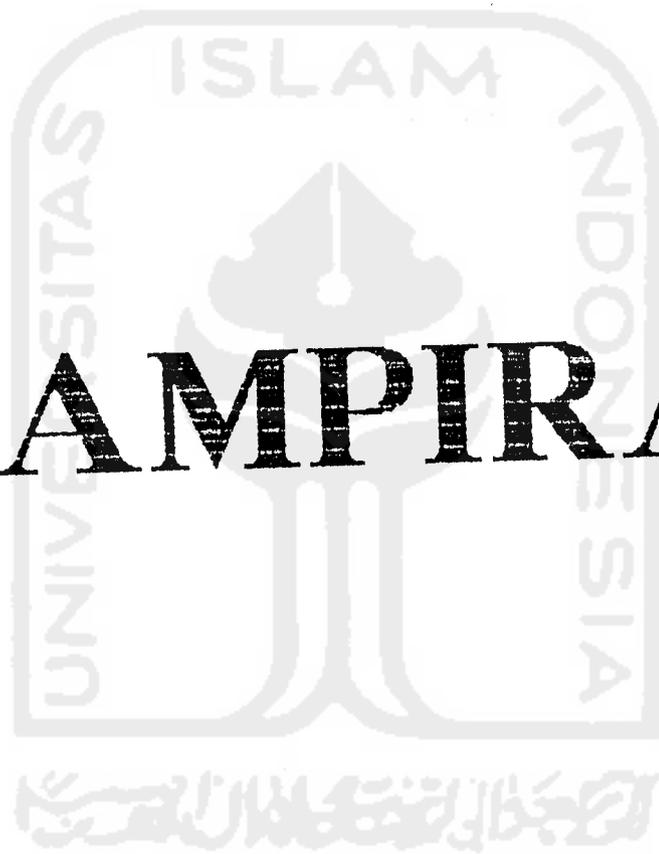
## DAFTAR PUSTAKA

1. American Institute of Steel Construction, ASCE, *Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design*, First Edition, 1986.
2. American Institute of Steel Construction, ASCE, *Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design*, Ninth Edition, 1989.
3. Clawson, W.C, Darwin, D, *Tests of Composite Beams with Web Openings*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST1, Paper No.16811, Jan,1982, pp.145 - 162.
4. Clawson, W.C, Darwin, D, *Tests of Composite Beams with Web Openings*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST3, Paper No.16939, Mar,1982, pp.623 - 641.
5. Congdon, J.G, Redwood, R.G, *Plastic Behavior of Beams with Reinforced Holes*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.96, No.ST9, Paper No.7561, Sept,1970, pp.1933 - 1956.
6. Donoghue, Michael, A.M, *Composite Beams with Web Openings: Design*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST12, Paper No.17571, Dec,1982, pp.2652 - 2667.
7. Padosbajayo, *Struktur Baja I*, Paguyuban Dosen Baja Yogyakarta, 1991.
8. Salmon, C.G, Johnson, J.E, *Struktur Baja, Disain dan Perilaku*, Jilid 2, Edisi ke-2, Alih Bahasa Wira, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1991.
9. Salmon, C.G, Johnson, J.E, *Struktur Baja I, Disain dan Perilaku*, Jilid 1, Edisi ke-3, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1992.
10. *Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings*, 8th ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill., Nov.1, 1978.
11. Spiegel, L, Limbrunner G.F, *Desain Baja Struktural Terapan*, Cetakan pertama, Alih Bahasa Ir. Bambang Suryoatmono, MSc, Penerbit PT. ERESKO, Bandung, 1991.

12. Todd, David M, Copper, Peter B, *Strength of Composite Beams with Web Openings*, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.106, No.ST2, Paper No.15179, Feb, 1980, pp.431 - 444.



# LAMPIRAN





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.	MUHAMMAD NURDIN SYAFEI	85310094		KONSTRUKSI
2.	ANI SOFIAN	84310329		KONSTRUKSI

Dosen Pembimbing I :  
 Dosen Pembimbing II :

: IR. M. TEGUH, MSCE.  
 : IR. H. HARSOYO, MSC.  
 2  
 Yogyakarta, 18 JULI 1995  
 Dekan.



AN.  
 KETUA JURUSAN TEKNIK SIPIL,



*[Signature]*  
 (IR. BAMBANG SULISTIONO, MSCE).  
 20/8/26  
*[Signature]*  
*[Signature]*

## LAMPIRAN I

Percobaan balok komposit dengan web openings yang dilakukan Clawson dan Darwin

### Bahan-bahan yang digunakan

Beton yang digunakan adalah kuat desak beton 3500 psi (24 MPa), dengan menggunakan bahan Portland Cement dan ukuran agregat maksimum 0,75" (19 mm), tinggi uji slum 3" (76 mm) dan udara terjebak 6 %. Balok baja type A36 Wide-flange, pengerjaan panas. Percobaan tarik baja dilakukan terhadap potongan semua balok. Kuat leleh statik maupun luluh normalnya material diukur. Tulangan beton terdiri atas tulangan Grade-40. Sifat-sifat material yang diperoleh dapat dilihat pada tabel I.

### Fabrikasi Balok

Balok-balok baja diperoleh dari pabrik baja struktural. Setiap balok baja dipotong masing-masing 18" (460 mm) untuk menentukan sifat-sifat material. Stud geser sisinya di las tangan pada sayap atas balok baja. Sepasang pengaku di las pada badan (web) balok baja. Pengaku tersebut dirapatkan pada sayap tetapi tidak dilas.

Untuk mengurangi konsentrasi tegangan pada sudut-sudut Web Openings dilubangi dengan diameter 3/4 in (76 mm), gambar 2.10. Opening dibuat dengan pemotongan

Tabel 1 Sifat-sifat Material dalam Kips/in<sup>2</sup>.

Beam Number (1)	CONCRETE		S T E E L		
	Compressive strength (ksi) (2)	Modulus of rupture (3)	Top Flange		
			Yield (ksi) (4)	Static yield (ksi) (5)	Tensile (ksi) (6)
1	4.00	—	39.37	34.92	61.33
2	4.20	0.675	39.27	38.88	68.84
3	4.93	0.600	39.27	38.88	68.84
4	4.46	0.470	46.39	44.38	73.28
5	4.68	0.590	43.88	40.93	65.40
6	4.02	0.510	42.94	39.44	67.11

Beam Number (1)	S T E E L					
	Bottom Flange			Web (horizontal)		
	Yield (ksi) (7)	Static yield (ksi) (8)	Tensile (ksi) (9)	Yield (ksi) (10)	Static yield (ksi) (11)	Tensile (ksi) (12)
1	40.39	35.84	61.85	38.54	34.57	60.93
2	39.88	38.97	69.39	42.44	40.58	70.55
3	39.88	38.97	69.39	42.44	40.58	70.55
4	44.89	41.44	71.42	52.00	48.71	74.86
5	45.10	41.86	67.04	44.23	39.47	63.70
6	43.47	39.57	66.61	49.80	43.76	67.06

Beam Number (1)	S T E E L				
	Web (Vertikal)			Reinforcing	
	Yield (ksi) (13)	Statik yield (ksi) (14)	Tensile (ksi) (15)	Yield (ksi) (16)	Tensile (ksi) (17)
1	—	—	—	—	—
2	—	—	—	54.50	82.00
3	—	—	—	54.50	82.00
4	—	50.81	74.67	54.50	82.00
5	43.62	40.77	63.94	59.10	87.20
6	48.12	43.67	67.79	59.10	87.20

menggunakan nyala las *Oxy Acetylene*, dirapikan pada tepi-tepinya, tetapi untuk penempatan alat pengukur regangan tidak boleh digrenda (dihaluskan) untuk menghindari terjadinya tegangan sisa.

Pelat landasan dilas pada bawah sayap. Dukungan balok-balok dibuat dari beton berukuran 15" persegi, dicor langsung pada lantai struktur. Sebagai tumpuan sederhana digunakan sendi dan rol. Kedua tumpuan tersebut dibuat dari batang baja bulat *Cold-rolled* berdiameter 5" (127 mm).

Kerangka bekisting untuk pelat direncanakan dengan menggunakan kerangka kayu. Setelah balok-balok baja diletakkan pada tumpuan, dilengkapi dengan alat pengukur regangan, bekisting di pasang ke posisi bagian atas sayap baja, dan merapat sama tinggi dengan bagian atas sayap balok baja. Bagian sambungan bekisting tersebut diberi dempul kemudian kerangka diminyaki. Tulangan memanjang dipasang di atas beton tahu setebal 1,5" (38 mm) dan diikat pada bekisting menggunakan kawat lunak. Tulangan baja melintang diletakkan diatas tulangan memanjang dan diikat dengan kawat. Sambungan tulangan memanjang direncanakan sesuai peraturan ACI *Building Code* dan tidak ditempatkan sekitar *Opening*.

*Bucket* untuk pengecoran beton menggunakan ukuran 1 Cu Yd ( $0.77 \text{ m}^3$ ) dan digetarkan dengan menggunakan Vibrator berfrekuensi tinggi, kemudian pelat beton diratakan. Pembuatan benda uji silinder dan lentur, serta pengukuran slump dan udara yang terjebak dilakukan pada waktu

pengecoran.

Rencana permukaan beton ditetapkan sesuai dengan rencana. pelat ditutupi dengan lembaran plastik. Bahan uji beton ditutupi dan ditempatkan dibawah balok. Bersamaan dengan perawatan beton, pelat dan benda uji silinder terus dibasahi dengan menyemprotkan air beberapa kali sehari. Kekuatan beton dimonitor melalui pengujian selinder dengan selang waktu yang teratur. Bekisting dibongkar setelah kuat tekan beton mencapai 3500 Psi (24 MPa).

#### **Penempatan peralatan dalam Percobaan.**

Enam balok percobaan dilengkapi dengan alat pengukur regangan bertahanan listrik yang ditempatkan pada beton dan baja. Alat pengukur regangan ditempatkan pada baja baik di bawah maupun diatas *opening*. Demikian juga untuk pelat, dipasang dipermukaan atas dan bawah pelat. Alat pengukur ditempatkan secara memanjang pada balok-balok 1.5" (38 mm) dari tepi *opening* untuk menghindari daerah konsentrasi tegangan dan 2.6" (66 mm) bagi balok nomor 4.

Alat pengukur regangan pada baja adalah 120 ohm, panjang alat ukur 1/4" (6,4 mm). Alat pengukur dilekatkan di atas permukaan baja yang telah diratakan secara sempurna dan dilekatkan ke baja, dengan tiga kawat yang terlindung, untuk memperkecil gangguan dan tahan terhadap kelembaban untuk meningkatkan stabilitas pengukuran dihubungkan ke pembacaan. Alat pengukur regangan beton adalah 120 ohm, panjang alat ukur 2.4" (61 mm). Alat pengukur dilindungi kertas pelindung. Alat pengukur dengan

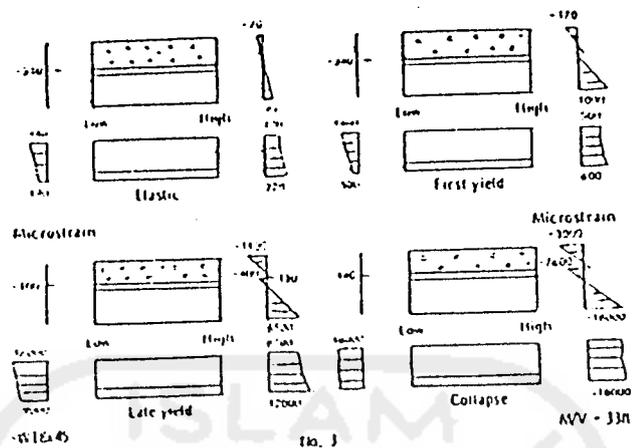
Tabel 2 Sifat potongan melintang balok

Beam Number	M/V of opening in feet	Steel Section			OPENING SIZE in inches
		Designation	Depth in inches	Web thickness in inches	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	7	W14 x 34	14	0.287	8 x 16
2	9	W18 x 45	17 7/8	0.356	10 13/16 x 21 5/8
3	33	W18 x 45	17 7/8	0.356	10 13/16 x 21 5/8
4	3	W18 x 45	17 7/8	0.343	10 13/16 x 21 5/8
5	6	W18 x 46	18 1/8	0.380	10 13/16 x 21 5/8
6	3	W14 x 34	14	0.296	8 x 16

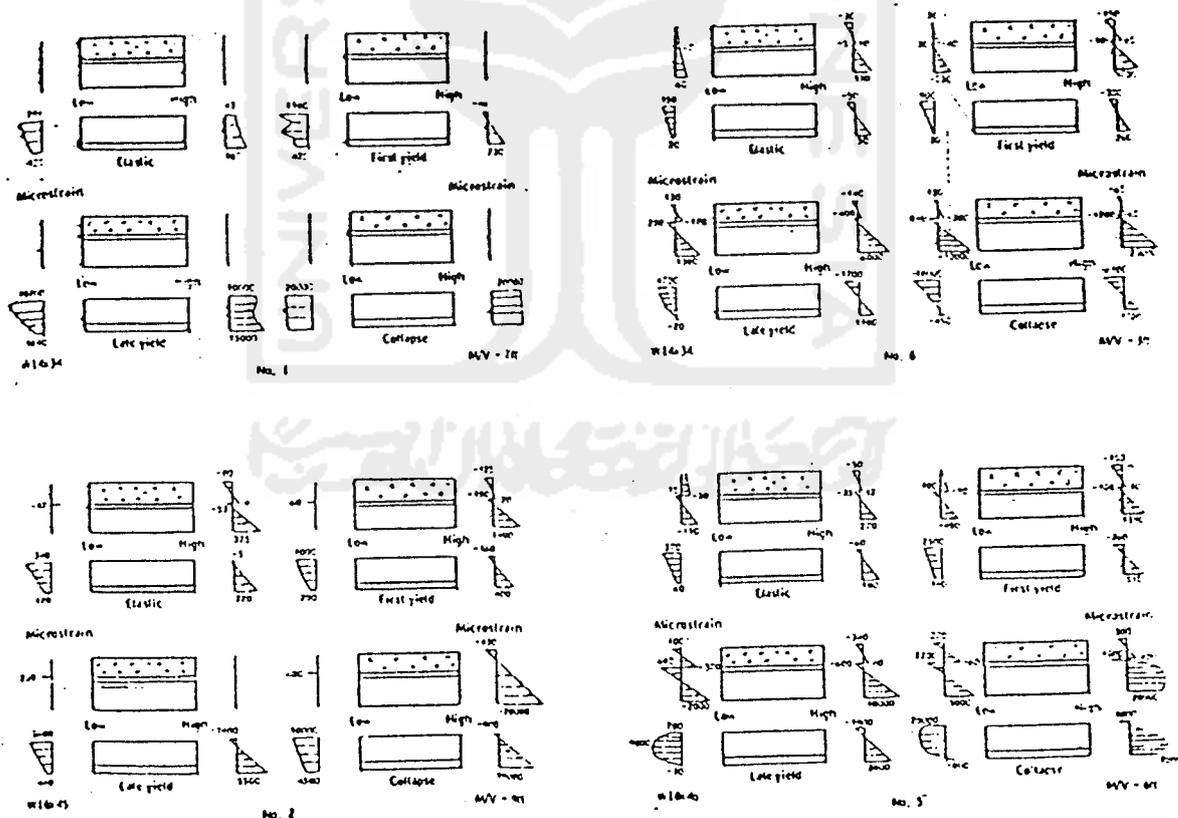
CONCRETE SLAB		TOP TEE			BOTTOM TEE		
Width in inch (7)	Thick-ness in inch (8)	Flange Width in inches (9)	Flange thick-ness in inches (10)	Stub Length in inches (11)	Flange Width in inches (12)	Flange thick-ness in inches (13)	Stub Length in inches (14)
48	4	6.75	0.453	2.55	6.75	0.453	2.55
48	4	7.50	0.475	3.00	7.50	0.520	3.25
48	4	7.50	0.475	3.13	7.50	0.520	3.13
48	4	7.50	0.485	3.00	7.50	0.495	3.06
48	4	6.00	0.623	3.06	6.00	0.615	3.13
48	4	6.69	0.475	2.38	6.69	0.423	2.38

tiga kabel kawat dihubungkan ke pembacaan dan sistem pembacaannya menggunakan sistem pengolahan data otomatis.

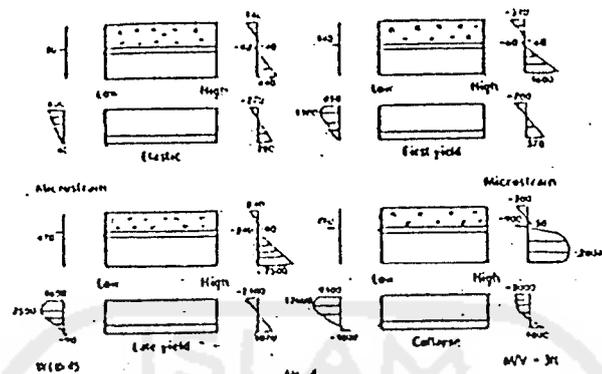
Alat ukur dengan ketelitian 0,001" (25,4  $\mu\text{m}$ ), dipakai untuk mengukur difleksi. Difleksi juga diukur dengan menggunakan LVDT (*linear variable differential transformel*), yang dihubungkan dengan sebuah Volt meter digital. Alat ukur dengan ketelitian 0,0001" (2,54  $\mu\text{m}$ ) di pakai pada ujung-ujung balok yang berguna untuk mengukur pergeseran relatif antara baja dan beton.



Gambar 1 Distribusi Regangan Balok no.3



Gambar 2 Distribusi Regangan Balok no.1,2,5 dan 6



Gambar 3 Distribusi Regangan Balok no.4

Untuk menghasilkan informasi visual pada daerah-daerah kritis dari regangan di sekitar *openings*, suatu lapisan rapuh dioleskan pada balok-balok. Pada empat balok pertama, kapur yang dicampur air dioleskan pada keseluruhan balok. Pada dua balok berikutnya air kapur dioleskan pada baja, namun pada beton dioleskan cat *latex* yang sedikit diencerkan dengan air. Cat *Latex* memberikan permukaan yang lebih baik untuk menandai keretakan dan retak beton, lebih mudah diidentifikasi.

#### Sistem Pembebanan

Balok-balok dibebani dengan menggunakan sistem pembebanan hidrolik. Pelat landasan ditempatkan diatas pelat beton sebagai alas beban di kedua titik. Balok beban diletakkan melintang dan ditempatkan diatas pelat landasan pada balok percobaan. Empat batang beban dihubungkan dengan balok beban dan diturunkan sampai lantai struktur.

Dongkrak hidrolik dipasang pada masing-masing batang untuk membebani. Batang beban dilengkapi dengan alat pengukur regangan 350 ohm, 1/4" (6,4 mm) yang berperan sebagai sel beban. Sistem beban beratnya 0,9 kips (4 kN) per titik beban.

### **Tes Elastis**

Sebelum dilaksanakan tes, pada masing-masing balok dilakukan pembebanan siklis sebanyak sepuluh kali, dengan pengulangan pembebanan menggunakan beban yang relatif kecil. Hal ini untuk mengurangi tegangan sisa dan untuk menempatkan posisi beban. Setelah itu dilakukan tiga tes elastis dan sekali tes kekuatan batas pada tiap-tiap balok. Pada saat tes elastis, balok-balok dibebani 5-10 tambahan kenaikan untuk mencapai beban maksimum dibawah luluh dengan baik. Setiap kenaikan beban, alat pengukur regangan, jumlah beban dan ukuran difleksi di baca. Setelah beban puncak tercapai, maka beban pada balok dikurangi sesuai dengan ukuran tambahan pembebanan pada saat melakukan penambahan beban sebelumnya.

### **Tes Kekuatan Batas**

Beban awal pada tes ini sama seperti pada beban terakhir tes elastis. Setiap penambahan beban berkisar antara 4 - 6 kips (18-27 kN). Pengontrolan beban dilakukan ketika balok mulai melunak dan timbul plastisitas. Pada kejadian ini, difleksi diamati. Difleksi pada garis tengah balok sudah ditentukan sebelumnya, dan beban ditambah hingga

difleksi tengah balok mendekati nilai tersebut. Pada saat pembacaan difleksi dan regangan, diperlukan pengurangan beban agar tercapai kestabilan pembacaan.

Retak-retak pada beton diberi tanda dan dicatat berapa besar beban yang dipikulnya. Sewaktu balok mendekati keruntuhan, besar beban diamati secara seksama untuk menentukan beban ultimitnya, mungkin balok mengalami kegagalan selama pembebanan. Sesudah balok runtuh sistem beban dilepas, retak-retak tambahan pada beton ditandai dan dilakukan pemotretan.

#### Penurunan di *Opening*

Aksi *Vierendeel* atau difleksi geser pada *Web Openings* dapat digambarkan sebagai penurunan vertikal relatif pada kedua ujung *Opening*,  $\delta_r$ . Untuk suatu perbandingan yang akurat,  $\delta_r$  dinormalisasikan terhadap difleksi garis tengah balok,  $\delta_c$ , untuk memperhitungkan kekakuan variasi penampang ( $\bar{\delta} = \delta_r / \delta_c$ ).

Momen lentur sekunder dihasilkan oleh transfer gaya geser melalui lubang dengan adanya tee atas dan bawah. Makin rendah rasio momen-geser makin banyak perpindahan geser melalui *opening* pada saat gagal, makin dekat pada efek *Vierendeel*. Balok no. 3 dengan perbandingan momen-geser tinggi yaitu sebesar 33 ft (10 m), menunjukkan aksi *Vierendeel* yang kecil. Pada saat gagal, penurunan relatif pada ujung-ujung *Opening* adalah kecil, kurang dari 0,5" (13 mm) dibanding dengan difleksi garis tengah,  $\delta_c$ ; pada kegagalan 4,3" (109 mm),  $\bar{\delta}$  hanya 0,12". Balok-balok

dengan ratio  $M/V$  lebih rendah menunjukkan aksi *Vierendeel* pada tingkat yang lebih besar, bersamaan dengan makin banyaknya gaya geser yang di transfer melalui lubang pada saat runtuh. Balok no. 1, 2 dan 5 dengan rasio  $M/V$  sebesar 7, 9 dan 6 ft (2,1, 2,7 dan 1,8 m), pada saat runtuh, menunjukkan penurunan relatif lebih besar yaitu, 0,8", 0,9" dan 0,7" ( 20, 23 dan 18 mm). Secara berturut-turut  $\delta_u$  adalah 0.16, 0.30 dan 0.63. Balok-balok dengan rasio  $M/V$  terendah, balok nomor 4 dan 6, menunjukkan penurunan relatif yang lebih kecil di antara ujung-ujung *Openings*, keduanya sekitar 0,5" (13 mm), tetapi secara berturut-turut nilai  $\delta$  berkisar 0.66 dan 0.50.

Bacaan regangan juga menunjukkan pengaruh ratio  $M/V$ . Momen besar, gaya geser kecil (balok no.3) mempunyai bacaan regangan (gambar 1) yang menunjukkan bahwa efek *Vierendeel* minimal. Tee bawah berperan sebagai batang tarik, sedangkan garis netral momen primer berada di Tee atas. Kegagalan balok adalah lentur normal. Pada sisi lain, momen sekunder merupakan bukti yang jelas untuk balok-balok dengan ratio  $M/V$  rendah (gambar 3). Dengan adanya tegangan desak dan juga tegangan tarik, regangan-regangan di tee bawah menunjukkan adanya aksi *Vierendeel*. Pada saat menurunnya rasio momen-geser, menjadikan daerah desak di tee bawah meningkat. Bacaan regangan untuk tes yang lainnya dapat dilihat pada gambar 2.

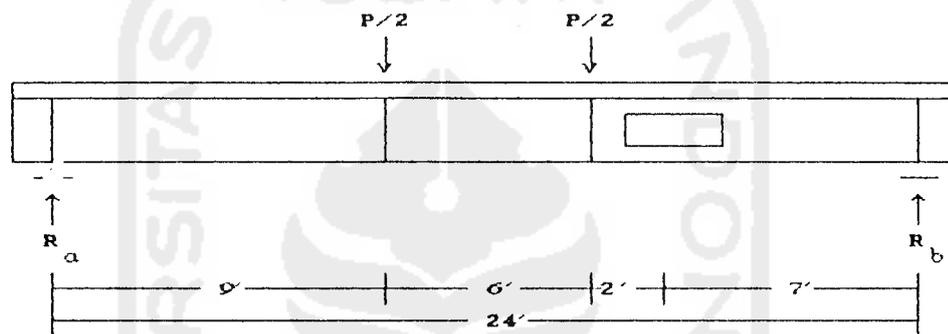
### **Regangan Desak**

Untuk semua percobaan, regangan desak pada beton

masih tetap rendah sampai baja mulai luluh. Kegagalan seluruh balok, disebabkan kegagalan beton (hancur atau retak). Pengerasan regangan baja pada tee bawah dan atas terjadi sesaat sebelum runtuh.

Detail dan hasil percobaan *Clawson* dan *Darwin* untuk setiap balok sebagai berikut.

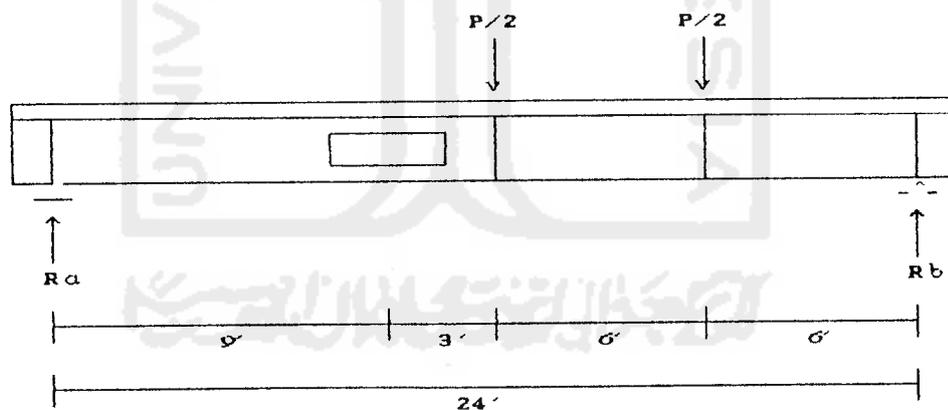
### 1. Balok No.1



- Profil  $W14 \times 34$
- Ukuran lubang 16" x 8"
- Beban pada luluh pertama  $P_{ly} = 26,5$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B;  $R_a = R_b = 13,25$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_{ly}$ ;  $M = 13,25 \times 84$   
 $= 1110$  inch-kips  
 ;  $V = 13,30$  kips
- Rasio  $M/V = \frac{1110}{13,3} = 83,46$  inch = 7 ft
- Beban Ultimit  $P_u = 64,5$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B;  $R_a = R_b = 32,25$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_u$ ;  $M = 32,25 \times 84$   
 $= 2710$  inch-kips  
 ;  $V = 32,20$  kips

Balok no. 1 di buat menggunakan penampang baja lebih kecil ( $W14 \times 34$ ). Percobaan ini dengan momen besar-geser besar, dengan rasio  $M/V$  pada *opening* menengah, 7 ft (2.1 m). Balok-balok ini diberi peralatan kurang lengkap di banding percobaan berikutnya, alat ukur regangan hanya di pasang di tee bawah disekitar *opening*. Pada awal luluh terjadi tarik pada ujung *opening* pada saat momen ujung di tee bawah rendah. Pada permulaan luluh, regangan desak kecil nampak pada bagian atas badan saat momen ujung tee bawah tinggi. Pada beban ultimit, keseluruhan meluluh dalam tarik. Kondisi runtuh terjadi ketika keretakan beton pada pusat *opening* terjadi pada seluruh pelat.

## 2. Balok No. 2



- Profil  $W14 \times 45$
- Ukuran Lubang 21.6" x 10.8
- Beban pada luluh pertama  $P_{ly} = 16.8$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B ;  $R_a = 6.3$  kips  
 $R_b = 10.5$  kips

- Momen akibat pembebanan  $P_{1y}$ ;  $M = 6,3 \times 108$   
 $= 680 \text{ in-kips}$   
 $; V = 6,3 \text{ kips}$
- Rasio  $M/V = \frac{680}{6,3} = 107,9 \text{ inch} = 9,0 \text{ ft}$
- Beban ultimit  $P_u = 96,2 \text{ kips}$
- Reaksi-reaksi di A dan B:  $R_a = 36,075 \text{ kips}$   
 $R_b = 32,25 \text{ kips}$
- Momen akibat pembebanan  $P_u$ ;  $M = 36,075 \times 108$   
 $= 3900 \text{ inch-kips}$   
 $; V = 36,10 \text{ kips}$

Balok no. 2, 3 dan 4 dibuat menggunakan profil  $W18 \times 45$ . Balok no. 2 mempunyai rasio  $M/V$  sebesar 9 ft di *opening*. Permulaan luluh terjadi tarik di ujung tee atas yang bermomen besar. Pada beban ultimit, di ujung tee bawah mengalami tarik, sedangkan di ujung yang bermomen besar mempunyai daerah desak yang kecil pada bagian atas badan. Titik balik lebih dekat ke ujung pada tee bawah yang bermomen kecil, sebagaimana pengaruh momen sekunder lebih dekat pada ujung yang bermomen besar. Pada ujung tee atas yang bermomen besar, baja sepenuhnya tarik, dengan garis netral pada pelat. Ketidak-cocokan regangan antara permukaan baja dan beton nampak hingga beban ultimit tercapai. Kegagalan pada balok ditunjukkan oleh retak-retak pada beton dekat pusat *opening*, dengan penyebaran ke seluruh pelat ke arah ujung yang bermomen tinggi, membentuk sudut sekitar  $45^\circ$ .

CATATAN - KONSULTASI

No.	Tanggal	Konsultasi ke:	KETERANGAN	Paraf
4/8 '95		1.	Perbaiki Pralaks Bunt abstrak Wktor asing dicetak masing-masing abstrak pada file → part atas librat berbis 2 di dalam	
2/8 '95	21/8 '95	2.	Tindakan Revisi + Tindakan Revisi 1/2 Bab II (Case 01) Fawidling carter perimbangan kerdulanya 5 atas dan per. revisi hasil proposal dgn standar internasional. - kerdulanya ≠ kerdulanya ultimate - penerapan (revisi kerdulanya) - ed. guru saat perbandingan 2 8/4/95 hasil - dalam 8'ed. - all update - librat kerdulanya & dalam - Perbaiki Bab IV dan ada pembatasannya - Perbaiki kesimpulannya dan saran	 Perbaiki pd. kesimpulannya - tambahkan kesimpulannya 1/2 '96
12/10 '95	23/10 '95	3	- ed. guru saat perbandingan 2 8/4/95 hasil - dalam 8'ed. - all update - librat kerdulanya & dalam - Perbaiki Bab IV dan ada pembatasannya - Perbaiki kesimpulannya dan saran	 kesimpulannya TA 5/2 '96
25/10 '95	11/11 '95		- Perbaiki kesimpulannya dan saran	 kesimpulannya TA 5/2 '96

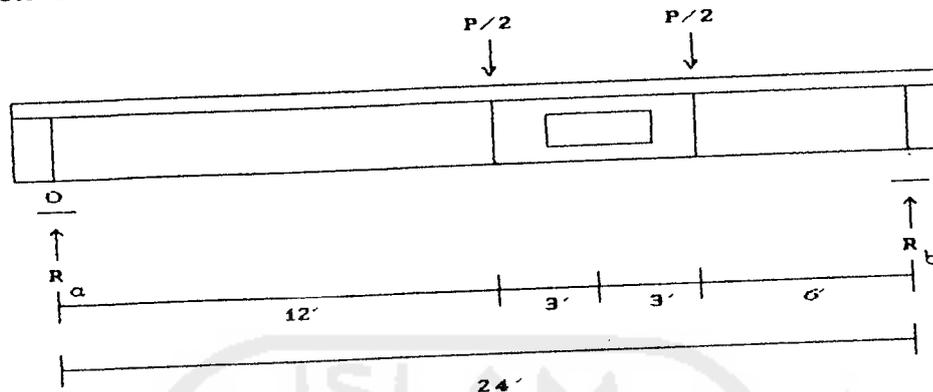
Perbaiki/ sempurnakan sedikit 20/8 '96  
 ACC dapat diperkanyak 21/8 '96

3/11 '96  
 Dikawatir oleh  
 sistem pembatasannya I

Perbaikan 1 penerapan  
 - kesimpulannya  
 - kesimpulannya

25/1 '96

## 3. Balok no. 3

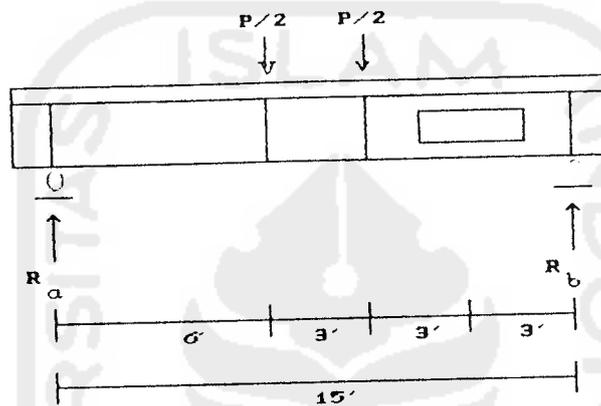


- Profil  $W4 \times 45$
- Ukuran Lubang 21,6" x 10,8"
- Beban pada luluh pertama  $P_{ly} = 31,7$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B;  $R_a = 11,887$  kips  
 $R_b = 19,813$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_{ly}$ ;  $M = 19,813 \times 108 - 31,7/2$   
 $\times 36 = 1570$  inch-kips  
;  $V = 3,96$  kips
- Rasio  $M/V = \frac{1570}{3,96} = 396,5$  inch = 33 ft
- Beban ultimit  $P_u = 106,5$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B:  $R_a = 39,937$  kips  
 $R_b = 66,563$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_u$ ;  $M = 66,563 \times 108 - 106,5/2$   
 $\times 36 = 5270$  inch-kips  
 $V = 13,3$  kips

*Opening* pada balok no. 3 mempunyai rasio  $M/V$  sebesar 33 ft (10 m). Meskipun seluruh tee bawah tarik, pengaruh *Vierendeel* dapat terlihat pada tahap pembebanan elastis. Pada permulaan luluh terjadi di ujung tee bawah yang bermomen rendah. Dengan tiadanya kekuatan geser besar di

seluruh penampang, tee bawah seluruhnya luluh dalam tarik, dengan garis netral di beton. Meskipun beberapa gaya di transfer melewati *opening*, balok gagal pada kondisi lentur (baja dibawah garis netral meluluh dan beton di atas mengalami kehancuran).

#### 4. Balok No. 4



- Profil W10x45
- Ukuran Lubang 21,6" x 10,8"
- Beban pada luluh pertama  $P_{ly} = 42,4$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B;  $R_a = R_b = 21,2$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_{ly}$ ;  $M = 21,2 \times 36$   
= 763 inch-kips

$$V = 21,2 \text{ kips}$$

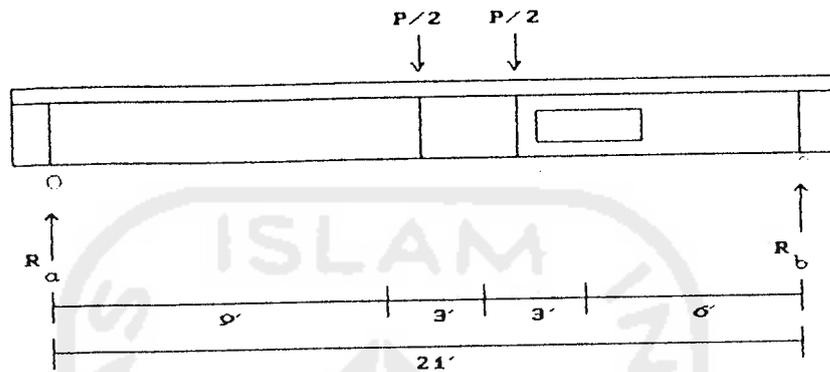
- Rasio  $M/V = \frac{763}{21,2} = 35,99 \text{ inch} = 3 \text{ ft}$
- Beban ultimit  $P_u = 93,00$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B :  $R_a = R_b = 46,5$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_u$ ;  $M = 46,5 \times 36$   
= 1670 inch-kips
- $V = 46,5$  kips

Balok no. 4 mempunyai rasio M/V sebesar 3 ft (0,9 m) di *opening*. Dengan rasio M/V kecil, pengaruh momen sekunder dominan. Selama tahap pembebanan elastis, di ujung tee bawah yang bermomen mengalami tarik, sedangkan daerah desak besar di bagian atas sayap tampak pada ujung yang bermomen besar. Bersamaan dengan penambahan beban, mulai terbentuk daerah desak kecil pada sayap di ujung yang bermomen kecil. Daerah desak di ujung yang bermomen besar juga mulai bertambah. Pada permulaan luluh terjadi dalam tarik di ujung tee atas yang bermomen besar. Pada pembebanan ultimit, garis netral berada di kedua ujung tee bawah, menunjukkan keberadaan momen sekunder. Pembacaan regangan menunjukkan slip antara baja dan beton di ujung tee atas yang bermomen besar (tidak ada keterangan tercatat di ujung yang bermomen rendah). Kegagalan terjadi pada beton, dengan pemisahan antara baja dan beton dekat pusat *opening*, diikuti dengan penyebaran retak tarik diagonal seluruh pelat.

Setelah balok no. 4 di test, pelat diambil dan sebuah *opening* dipotong di ujung lain balok, dengan menggunakan rasio M/V yang sama. Balok baja (balok no. 4b) di test untuk mengetahui ukuran kontribusi beton terhadap kekuatan balok komposit di *Web Openings*. Dengan terbentuknya sendi plastis di ujung-ujung tee atas dan tee bawah, balok runtuh. Geser ultimit pada *opening* adalah 28,0 kips (125 kN), dengan momen primer 1.010 in-kips (113 m-MN). Perbandingan hasil tersebut (tabel 3) menunjukkan bahwa pelat pada balok no. 4 dekat *opening* bertambah kekuatannya

70%. Rasio  $M/V$  kecil pada *opening* menunjukkan bahwa beton nyata-nyata menambah kekuatan geser pada balok.

### 5. Balok No.5

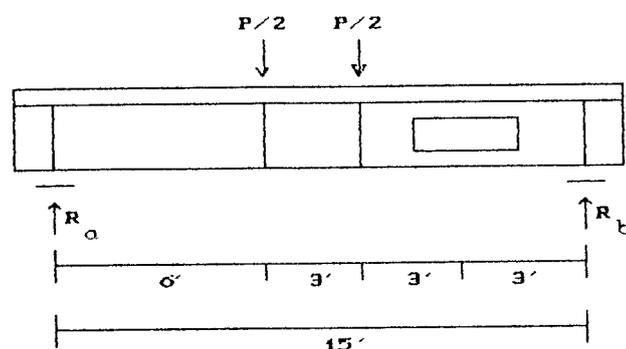


- Profil  $W18 \times 46$
- Ukuran Lubang 21,6" x 10,8"
- Beban pada luluh pertama  $P_{ly} = 20,8$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B;  $R_a = R_b = 14,14$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_{ly}$ ;  $M = 10,40 \times 72$   
 $= 745$  inch-kips  
 $; V = 10,40$  kips
- Rasio  $M/V = \frac{745}{10,4} = 71,6$  inch = 6 ft
- Beban ultimit  $P_u = 94$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B;  $R_a = R_b = 47$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_u$ ;  $M = 47 \times 72$   
 $= 3384$  inch-kips  
 $; V = 47$  kips

Percobaan balok no. 5 adalah suatu percobaan momen besar-geser besar, dengan rasio  $M/V$  di *opening* sebesar 6 ft (1,8 m). Profil balok baja dipakai  $W18 \times 46$ . Pada

beban-beban kecil, di ujung tee bawah yang bermomen rendah mengalami tarik, sedangkan daerah desak muncul pada badan atas di ujung yang bermomen besar. Pada permulaan luluh terjadi pada ujung yang bermomen kecil. Bersamaan balok mencapai beban ultimit regangan desak kecil terlihat di ujung tee bawah yang bermomen rendah. Ujung yang bermomen rendah luluh dalam tarik. Di ujung tee bawah yang bermomen besar di bagian atas badan meluluh dalam desak, tarik pada sayap dan pada badan. Pada ujung tee atas momen besar baja luluh dalam tarik dan di ujung momen rendah dalam desak. Slip terjadi pada permukaan baja dan beton, bersamaan ketidak-cocokan regangan muncul pada kedua ujung tee atas yang bermomen (rendah dan tinggi). Pengaruh sekunder dominan seperti ditunjukkan oleh tegangan desak besar pada baja bagian atas di ujung tee atas yang bermomen kecil. Pada saat beban ultimit dicapai disekitar dekat pusat *opening*, baja dan beton mulai terpisah. Suatu retak tarik diagonal besar terbentuk pada titik ini dan mulai menyebar keluar pada permukaan bawah pelat. Beban ultimit tercapai sewaktu retak menyebar ke seluruh pelat.

#### 6. Balok No 6



- Profil  $W14 \times 34$
- Ukuran lubang 16" x 8"
- Beban pada luluh pertama  $P_{ly} = 16.10$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B;  $R_a = R_b = 8.05$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_{ly}$ ;  $M = 8.05 \times 36$   
 $= 290$  inch-kips  
 ;  $V = 8.05$  kips
- Rasio  $M/V = \frac{290}{8.05} = 36.02$  inch = 3 ft
- Beban ultimit  $P_u = 77.8$  kips
- Reaksi-reaksi di A dan B ;  $R_a = R_b = 38.9$  kips
- Momen akibat pembebanan  $P_u$ ;  $M = 39.40 \times 36$   
 $= 1420$  inch-kips  
 ;  $V = 39.40$  kips

Balok no. 6 merupakan percobaan dengan momen kecil - geser besar. Percobaan ini dibuat menggunakan penampang  $W14 \times 34$  dan sebagai tambahan percobaan balok no. 1. Rasio  $M/V$  sebesar 3 ft (0,9 m) dan sifat-sifat balok sepenuhnya didominasi oleh pengaruh momen lentur sekunder. Seperti terlihat pada gambar 2.14b, pada saat beban elastis yang bermomen ujung tee bawah kecil dalam keadaan tarik, sedangkan ujung atas badan pada yang bermomen ujung besar dalam keadaan desak. Permulaan luluh terjadi pada yang bermomen ujung tee atas besar. Pada beban ultimit, yang bermomen ujung pada tee bawah rendah terbentuk daerah desak pada sayap (tidak luluh), sedangkan sisa badan dan sayap bagian atas meluluh dalam keadaan tarik. Pada yang bermomen ujung pada tee bawah besar, ukuran daerah desak bertambah sampai pada beban ultimit, seluruh badan dan

Tabel.3 Hasil Percobaan Balok Komposit dengan *Web Openings* dengan Beban tertentu.

Beam Number (1)	M/V <sup>a</sup> of Opening in feet (2)	First Yield			Location (6)
		P <sup>total</sup> (P <sub>ly</sub> ) <sup>a</sup> in kips (3)	M at Opening <sup>a</sup> in inch-kips (4)	V at Opening <sup>a</sup> in kips (5)	
1	7	26.5	1,110	13.30	Bottom Tee
2	9	16.8	680	6.30	Top Tee
3	33	31.7	1,570	3.96	Bottom Tee
4	3	42.2	763	21.20	Top Tee
5	6	30.7	745	10.40	Bottom Tee
6	3	16.1	290	8.05	Top Tee

Maximum Load			P <sub>ly</sub> / P <sub>u</sub> <sup>a</sup> (10)	Mode of Failure (11)
P <sup>total</sup> (P <sub>u</sub> ) <sup>a</sup> in kips (7)	M at Opening in in - kips (8)	V at Opening in kips (9)		
64.5	2,710 <sup>a</sup> (2,887) <sup>b</sup>	32. 2 <sup>a</sup> (33.4) <sup>b</sup>	0.41	Shear <sup>c</sup>
96.2	3,900 (4,099)	36. 1 (36.8)	0.17	Shear <sup>c</sup>
106.5	5,270 (5,468)	13. 3 (14.0)	0.30	Flexure <sup>d</sup>
93.0	1,670 (1,723)	46. 5 (47.6)	0.46	Shear <sup>c</sup>
94.0	3,380 (3,513)	47. 0 (48.1)	0.22	Shear <sup>c</sup>
77.8	1,420 (1,470)	39. 4 (40.4)	0.21	Shear <sup>c</sup>

Keterangan:

- a) <sup>a</sup>Beban P
- b) <sup>b</sup>Beban P + Beban Mati
- c) <sup>c</sup>Beton gagal pada daerah tarik diatas lubang
- d) <sup>d</sup>Beton hancur diatas lubang

bagian atas sayap luluh karena desak. Bagian bawah sayap luluh karena tarik. Tee atas juga menunjukkan pengaruh sekunder. Pada yang bermomen ujung tinggi baja luluh dalam tarik. sedangkan pada yang bermomen ujung rendah, baja luluh dalam desak.

Pembacaan regangan tidak konsisten pada permukaan baja dan beton di kedua yang bermomen ujung kecil dan pada momen ujung besar. Suatu pemisahan yang terjadi antara baja dan beton dekat pusat *opening* pada pembebanan tinggi (75% beban ultimit). Retak-retak tarik diagonal mulai menyebar dari daerah ini di kedua sisi pelat. Pada beban ultimit, retak-retak menyebar keluar ke arah ujung yang bermomen tinggi dan keseluruhan pelat.

Untuk ke enam balok, awal luluh terjadi tarik disalah satu bagian bawah dari ujung tee atas yang bermomen tinggi atau di ujung tee bawah yang bermomen rendah. Itulah tempat-tempat efek momen primer dan sekunder saling menambah. Demikian juga ketidak-simetrisan bentuk tee menjadikan ujung-ujung *opening*, titik-titik berregangan tertinggi, disebabkan oleh momen lentur sekunder. Hasil pada tabel 3 tidak menunjukkan suatu pedoman penempatan. Untuk penempatan alat ukur regangan diletakkan 1.5 in (38 mm) dari tepi *opening*, untuk seluruh balok kecuali balok nomor 4. Pada permulaan luluh ditunjukkan oleh 0,17-1,41 dari beban ultimit dan ini tidak menunjukkan kepastian kekuatan penampang. Secara umum, balok baja dengan dua ukuran tampang yang berbeda berperilaku sama.

#### **Penerapan-penerapan Praktis**

Hasil tes menunjukkan bahwa pelat beton memberikan kontribusi pada kekuatan geser balok komposit di *Web Openings*. Hal ini menyiratkan bahwa, apabila pengabaian pelat dalam praktek perencanaan geser komposit

memungkinkan angka keamanan yang cukup. demikian ini terlalu hati-hati untuk tidak menghitung pelat disekitar *Web Openings*. Kontribusi pelat yang dapat diperhitungkan dapat menjadikan penggunaan *Web Openings* secara ekonomis, ini merupakan suatu pilihan yang menarik untuk balok komposit. Meskipun kapasitas balok berkurang dengan adanya *opening*, perencana dapat memanfaatkan tambahan kekuatan geser oleh pelat yang tidak diperhitungkan dalam perencanaan. Penghematan dan pengurangan material bangunan gedung, menjadikan penggunaan *web openings* sebagai suatu penelitian yang sangat berharga.

### Kesimpulan

Kesimpulan yang diketengahkan di sini berdasarkan pada percobaan enam balok komposit dan satu balok baja. Dengan menggunakan dua ukuran penampang baja, sedangkan ukuran pelat sama.

1. *Web Openings* sangat mengurangi kekuatan balok komposit.
2. Hampir keseluruhan *Web Openings*, regangan desak beton tetap rendah selagi baja mulai luluh.
3. Pembebanan pada luluh pertama yang terjadi pada baja dekat *Openings* tidak mewakili kekuatan ultimit balok.
4. Sifat kegagalan balok komposit dengan *Web Openings* adalah liat. Kegagalan beton didahului oleh luluh baja di sekitar *Openings*.
5. Kegagalan balok komposit di *Web Openings* ditentukan olehagalnya beton.

6. Sebelum gagal pada *Web Opening* slip antara beton dan baja menunjukkan nilai yang besar. Hal itu tidak jelas, apakah slip tersebut berpengaruh penting pada kekuatan.

7. Beton pada balok komposit memberikan andil yang nyata untuk kekuatan momen dan juga untuk kekuatan geser balok di *Web Openings*.

8. Sebelum kuat geser mendekati kapasitas geser penampang, kapasitas momen pada suatu *web openings* relatif tidak dipengaruhi oleh kuat geser.

9. Rasio momen-geser pada suatu *opening* mempunyai pengaruh tertentu pada mode gagal. Balok-balok dengan rasio  $M/V$  tinggi gagal oleh luluh secara umum pada baja di bawah garis netral dan hancurnya beton di atas garis netral. Balok dengan rasio  $M/V$  rendah sampai menengah gagal karena terjadinya pembentukan sendi-sendi plastis di tee bawah, disertai dengan kegagalan tarik diagonal dalam beton.

## LAMPIRAN II

## Faktor Konversi Satuan

dari	ke	dikalikan
cm	inch	0,3937
m	feet	3,2808
feet	inch	12,0000
cm <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>	0,1550
m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	10,7643
kg	lb	2,2046
kg	kips	0,0022
ksi	Mpa	6,9000
kips	kN	4,4500
kg/cm <sup>2</sup>	psi	14,2248
kg/m <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	0,0624
kg/m <sup>2</sup>	lb/ft <sup>2</sup>	0,2048