

BAB III
TINJAUAN
TIANG PANCANG BETON PRATEGANG

3.1 Pengertian

Pengertian dari tiang pancang beton prategang adalah suatu jenis pondasi tiang dengan menggunakan beton prategang sebagai strukturnya, sedangkan dalam hal pemasangan pondasi tersebut ke dalam tanah dilakukan dengan cara dipancang menggunakan alat pemancang.

Beton prategang adalah suatu sistem struktur beton khusus yang dirancang dengan memberikan tegangan desak awal tertentu pada struktur sebelum digunakan untuk mendukung beban luar yang bertujuan untuk mengurangi atau bahkan menghilangkan gaya tarikan yang bekerja pada beton saat struktur mendukung beban luar yang terjadi.

Tiang pancang merupakan komponen struktur yang memikul beban tekan eksternal. Suatu komponen tekan sebenarnya jarang menggunakan beton prategang, sebab struktur beton bertulang biasa sudah mampu memikul beban tekan dengan lebih baik tanpa diberi gaya prategang. Akan tetapi tiang pancang akan mengalami lenturan pada saat pengangkatan, pemancangan dan di bawah kondisi layan tertentu. Akibat dari lenturan tersebut, akan menimbulkan tarikan pada sisi beton yang pada kondisi tertentu dapat menimbulkan

keretakan pada beton tersebut. Untuk mengantisipasi kondisi tersebut, maka struktur harus diperkuat terhadap pengaruh lenturan tersebut dengan cara memberikan gaya prategang.

3.2 Keuntungan Penggunaan Pondasi Tiang Pancang Prategang

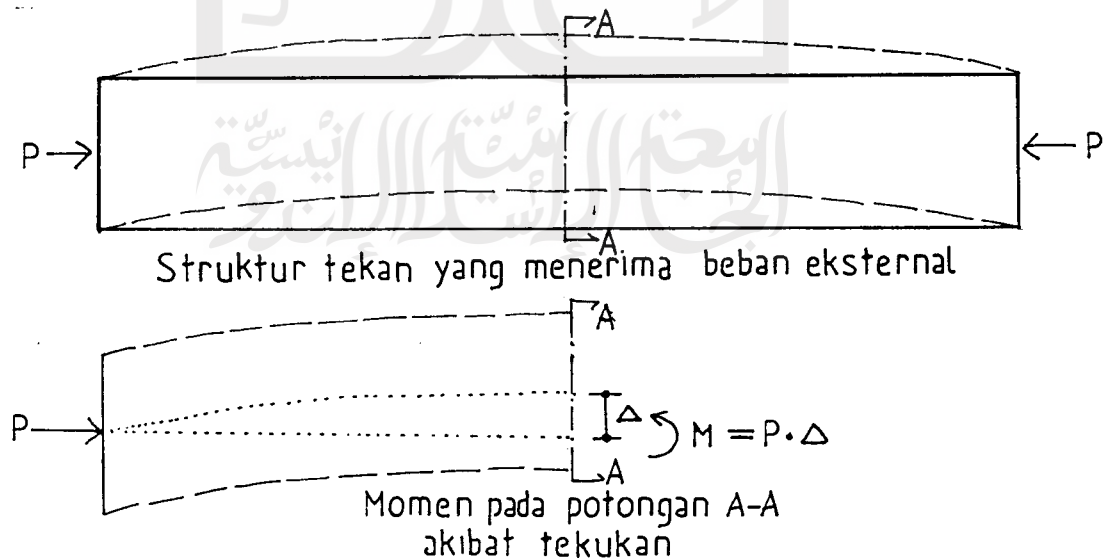
Pondasi tiang pancang prategang dewasa ini semakin banyak digunakan dalam perencanaan struktur bangunan yang menggunakan pondasi dalam, dengan pertimbangan bahwa pondasi jenis ini memiliki keuntungan antara lain:

- a. kapasitas dukung beban dan momen yang tinggi,
- b. mengurangi lendutan dan tekukan yang terjadi sehingga dapat menghindarkan beton pada daerah tarik mengalami keretakan yang bisa mengurangi kapasitas dukung tiang,
- c. keawetan/daya tahan yang baik sekali jika dibandingkan dengan beton konvensional, karena memiliki ketahanan terhadap retak, sehingga struktur tetap dalam keadaan elastis,
- d. relatif mudah penanganan, transportasi dan pemancangan,
- e. kualitas mutu yang terjamin karena dikerjakan berdasarkan perhitungan yang matang dan ketelitian yang tinggi.

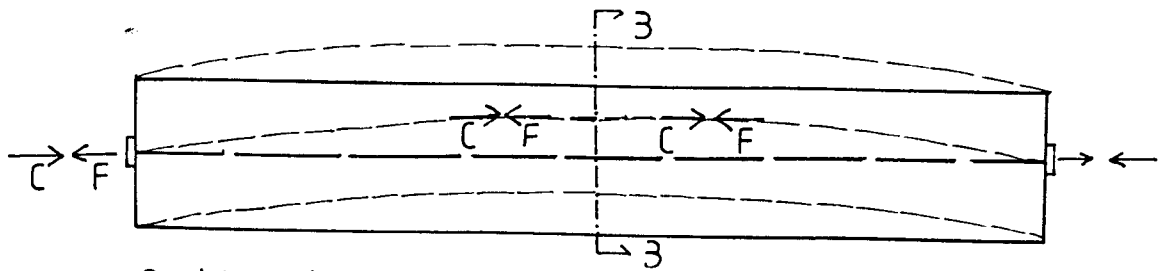
3.3 Efek Tekukan Akibat Gaya Prategang

Suatu komponen struktur tekan akan cenderung tertekuk bila menerima beban eksternal. Namun bila komponen struktur tekan tersebut menerima beban internal akibat gaya prategang, maka efek tekukan yang ditimbulkan akan berkurang, bahkan bisa mendekati nol. Keterangan lebih lengkap akan dijelaskan dalam uraian berikut ini.

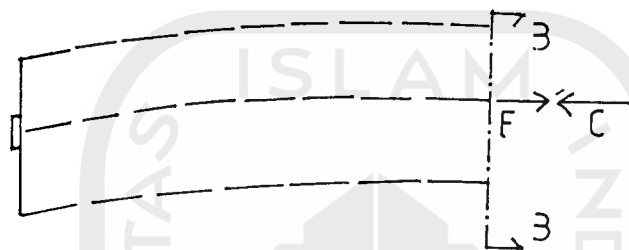
Ditinjau suatu komponen struktur tekan yang berada di bawah pengaruh beban eksternal seperti gambar (3.1). Bila struktur tekan tersebut tertekuk, maka momen tambahan akan timbul pada penampang A-A. Hal tersebut diakibatkan karena adanya eksentrisitas yang berbeda pada penampang. Jadi momen tambahan tersebut timbul akibat efek tekuk. Namun jika komponen tersebut tertekan secara internal akibat gaya prategang (gambar 3.2.a), maka selama baja dan beton melendut bersama, tidak ada perubahan eksentrisitas gaya prategang pada beton atau eksentrisitas tambahan pada struktur tersebut. Dengan demikian, maka tidak akan ada perubahan momen akibat tekukan pada struktur tersebut karena tidak adanya efek tekuk yang ditimbulkan. Jika struktur tekan beton prategang tersebut memikul beban eksternal, maka efek tekuk tetap akan terjadi dan menimbulkan momen tambahan pada struktur.



Gambar 3.1. Efek tekuk akibat beban eksternal



Struktur tekan prategang dengan gaya internal f

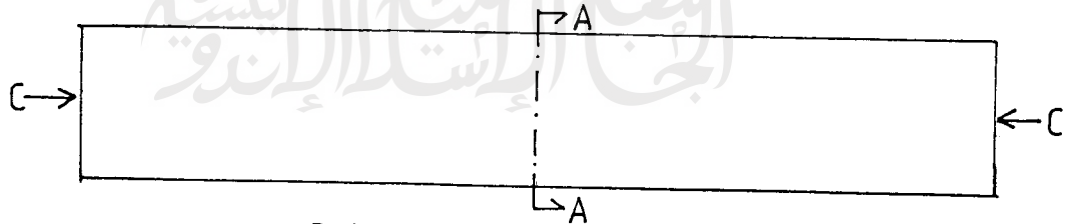


Tidak ada momen pada potongan B-B akibat lendutan

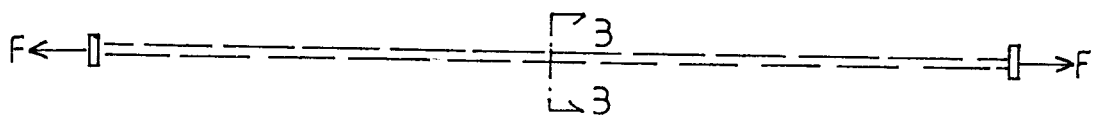
Gambar 3.2.a Efek tekuk akibat gaya prategang



Komponen struktur beton prategang



Beton sebagai benda bebas



Baja sebagai benda bebas

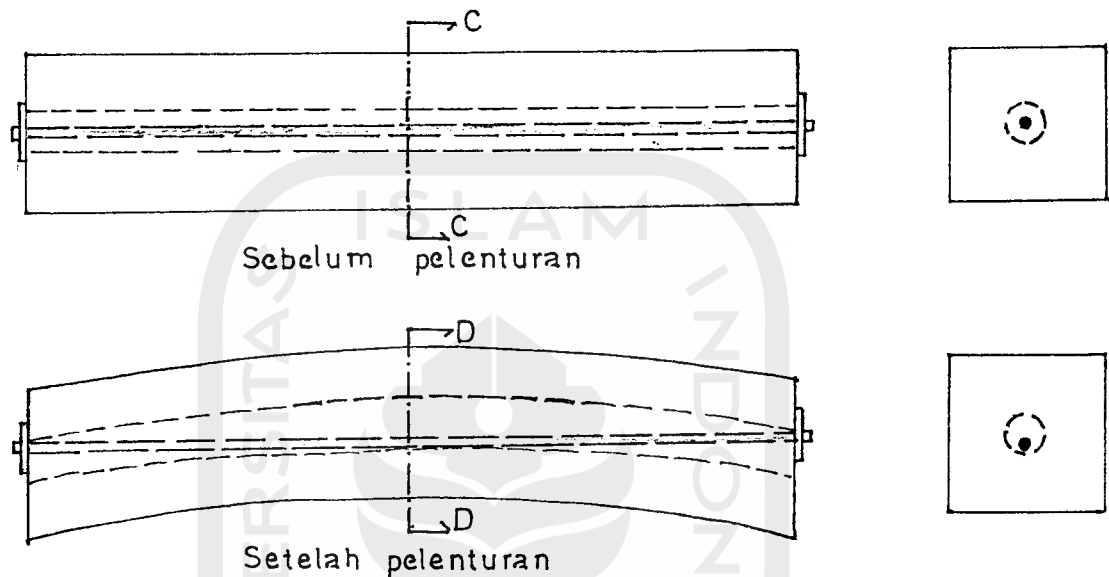
Gambar 3.2.b Aksi pengimbangan dari beton dan baja

Cara lain untuk menjelaskan permasalahan ini adalah dengan jalan memisahkan peninjauan antara baja dengan beton dan memperlakukan keduanya sebagai dua komponen yang berbeda seperti dalam gambar (3.2.b). Beton yang ditinjau tersendiri tersebut merupakan suatu struktur tekan yang berada di bawah gaya aksial langsung, dan sedikit lenturan saja pada kolom tersebut akan menimbulkan eksentrisitas pada penampang seperti pada potongan A-A. Tetapi dengan meninjau baja sebagai sebagai suatu elemen bebas, maka akan ada eksentrisitas serta gaya yang sama, namun berlawanan arah, sehingga cenderung untuk meluruskan struktur tersebut seperti semula. Kecenderungan untuk melurus kembali ini persis sama besar sebagai reaksi atas aksi yang terjadi pada struktur tersebut, sehingga efek tekuk tidak akan terjadi.

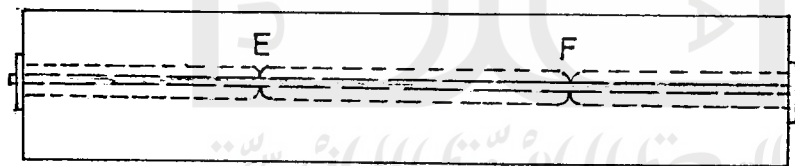
Jika baja dan beton tidak bersentuhan langsung pada keseluruhan panjangnya (gambar 3.3.a), maka beton yang tertekan akibat gaya prategang akan cenderung tertekuk kearah lateral dan pada mulanya tekukan ini tidak akan diimbangi oleh baja prategang. Hal tersebut akan menimbulkan eksentrisitas pada beton, sehingga akan menimbulkan efek tekuk pada struktur tersebut. Setelah terjadi sejumlah tekukan, baja prategang akan bersentuhan dengan beton, dan keduanya akan melendut bersama, sehingga efek tekuk yang lebih besar tidak akan terjadi. Dengan demikian efek tekukan yang terjadi akan terbatas hingga kedua bahan tersebut bersentuhan.

Jika baja prategang bersentuhan dengan beton pada be-

berapa titik, misalnya pada titik E dan F (gambar 3.3.b), maka efek tekuk akan dibatasi hanya pada sepanjang antara titik-titik tersebut. Jika jarak antara titik-titik sentuhan itu pendek, maka efek tekuk yang terjadi tidak begitu besar.



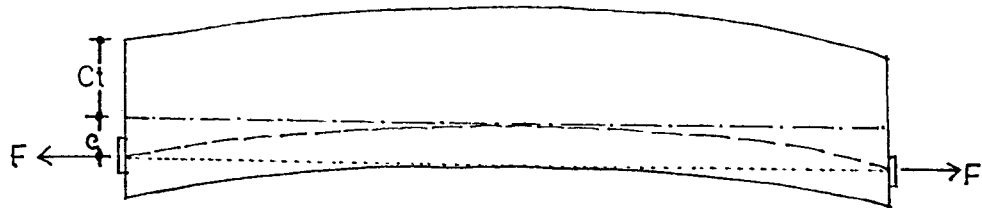
Gambar 3.3.a Baja dan beton bersentuhan setelah pelenturan



Gambar 3.3.b Baja dan beton bersentuhan pada beberapa titik

Untuk gaya prategang eksentris (gambar 3.4), gaya tekan pada beton akan tetap sama besar dan berlawanan arah dengan tarikan pada baja, sehingga tidak terjadi efek tekuk akibat gaya prategang. Akan tetapi, pengaruh eksentrisitas gaya prategang yang bekerja pada beton akan menimbulkan lendutan pada struktur. Lendutan tersebut akan

menimbulkan momen tambahan pada penampang, walaupun pada kondisi ini beton prategang belum menahan beban eksternal.



Gambar 3.4. Prategang eksentris dan efek lendutannya

Dari uraian di atas, maka dapat disimpulkan bahwa tidak akan ada efek tekuk pada struktur tekan yang diberi gaya prategang konsentris dengan elemen baja prategang yang berada dalam kontak langsung dengan beton pada arah panjangnya. Kondisi ini akan menguntungkan, karena pada saat layan kemampuan struktur untuk menahan tekuk tidak berkurang akibat gaya prategang.

Berdasarkan uraian di atas, maka struktur tekan beton prategang harus direncanakan dengan memberikan gaya prategang yang konsentris atau berimpit dengan pusat luasan transformasi penampang. Di samping itu baja prategang harus berada dalam kontak langsung dengan beton pada arah panjangnya untuk menjamin tidak adanya efek tekuk tambahan lainnya yang dapat mengurangi kemampuan beton prategang menahan gaya eksternal. Dengan demikian sistem prategang jenis pratarik ("pretensioning system") dengan gaya prategang yang konsentris merupakan jenis yang cocok untuk diterapkan pada komponen struktur tekan, sebab telah memenuhi persyaratan di atas.

3.4 Tegangan-tegangan Ijin

Dalam mendesain suatu pondasi tiang pancang beton prategang maka yang menjadi pertimbangan utama adalah tegangan-tegangan yang timbul selama penanganan dan pemancangan yang sifatnya sementara, dan tegangan-tegangan yang disebabkan oleh beban permanen (beban mati), beban hidup, dan beban tidak tetap seperti angin, gempa bumi dan lain-lain.

Tegangan-tegangan yang diperkenankan pada beton dan baja untuk kondisi beban yang berlainan seperti yang telah ditetapkan oleh komite PCI pada pemancangan tiang beton prategang disusun dalam tabel (3.1).

Tegangan lentur yang timbul di bawah kondisi-kondisi penanganan yang berlainan, seperti pengangkatan dari tempat pencetakan, penyimpanan dan pengangkutan, harus dianalisis berdasarkan berat tiang pancang ditambah kelonggaran 50 persen untuk tumbukan dengan tegangan tarik dibatasi sampai $0,5 (f_c)^{1/2}$ sesuai dengan tabel PCI.

Pada saat pemancangan, tiang pancang juga akan mengalami tegangan lentur. Tegangan lentur yang terjadi pada saat pemancangan adalah berupa tegangan dinamik. Tegangan dinamik yang timbul selama pemancangan tiang merupakan fungsi kompleks dari tiang pancang dan sifat-sifat tanah, serta dipengaruhi oleh tahanan pemancangan, berat pemukul,

Tabel 3.1. Tegangan-tegangan beton dan baja yang diperkenankan pada Tiang Pancang beton prategang.

<i>Tegangan Beton</i>	
1. Tekanan aksial merata untuk tiang pancang pondasi yang tertanam penuh dalam tanah yang memberikan dukungan lateral.	$0,33 f'_c - 0,27 f_{pe}$
2. Tarikan aksial merata :	
Permanen dan berulang	0
Tidak tetap	$0,5 (f'_c)^{\frac{1}{2}}$
3. Tekanan akibat lenturan :	
Normal	$0,45 f'_c$
Pekerjaan di laut dan jembatan	$0,40 f'_c$
4. Tarikan akibat lenturan :	
Permanen dan berulang	$0,34 (f'_c)^{\frac{1}{2}}$ atau nol di lingkungan mudah berkarat
Tidak tetap	$0,5 (f'_c)^{\frac{1}{2}}$
5. Prategang efektif (nilai-nilai yang direkomendasi :	
Untuk tiang pancang 12 - 52 m	4,9 - 8,4 N/mm ²
Untuk tiang pancang lebih pendek dari 12 m	2,8 - 4,9 N/mm ²
<i>Tegangan Baja</i>	
1. Tegangan sementara :	
Akibat daya dongkrak sementara, tetapi tidak lebih besar dari nilai maksimum yang direkomendasikan oleh produsen baja	$0,8 f_{pu}$
Tendon pratarik segera setelah transfer atau tendon pascatarik segera setelah pengankuran	$0,70 f_{pu}$
Tarikan akibat beban tak tetap	Beton yang menentukan
2. Prategang efektif (f_{pse})	$0,6 f_{pu}$ atau $0,8 f_{py}$ (diambil yang lebih kecil)
3. Baja prategang yang tak ditegangkan	$0,5 f_{py}$ (maksimum 210 N/mm ²)

Sumber : N. Krishna Raju (1989)

tinggi pukulan, material pelindung, dan parameter-parameter lainnya. Tegangan tersebut terdiri dari tegangan tekan dan tegangan tarik berganti-ganti yang mencapai kira-kira sebesar 7 sampai 28 N/mm² (tekan) dan 10 N/mm² (tarik). Tegangan tarik mungkin timbul pada tiang pancang yang lebih panjang dari 12 m, pada kondisi ujung tiang mengenai tanah lunak pada waktu pemancangan. Didalam hal tiang pancang yang lebih pendek, tegangan pancang tarik jarang sekali timbul.

Untuk menahan tegangan akibat pemancangan tersebut, maka nilai prategang efektif minimum yang ditetapkan oleh berbagai pihak yang berwenang di seluruh dunia adalah berkisar antara 2,8 hingga 4,9 N/mm² untuk tiang pancang dengan panjang kurang dari 12 m, dan antara 4,9 hingga 8,4 N/mm² untuk tiang pancang dengan panjang antara 12 hingga 52 m (tabel 3.1.5).

3.5 Luas baja prategang yang Diperlukan

Luas baja prategang (A_{ps}) yang diperlukan, dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$A_{ps} = \frac{P_e}{f_{pse}} \dots \dots \dots (3.1)$$

dengan:

f_{pse} = tegangan baja prategang efektif (Mpa),

P_e = gaya prategang efektif (N),

$$= f_{pe} \cdot A_c,$$

f_{pe} = tegangan pada seluruh penampang akibat gaya prategang efektif / Nilai prategang efektif (Mpa),

A_C = Luas bruto penampang (mm),

Kebutuhan baja prategang yang paling efisien bisa didapatkan dengan cara mengoptimalkan penegangan baja melalui pemanfaatan tegangan baja prategang efektif (f_{pse}) semaksimal mungkin asal memenuhi persyaratan-persyaratan sesuai dengan rekomendasi komite PCI, yaitu nilai terkecil antara $0,6 f_{pu}$ dan $0,8 f_{py}$.

Hal lain yang perlu diperhatikan dalam merencanakan jumlah tulangan prategang adalah batas minimum dari nilai prategang efektif (f_{pe}) sesuai dengan penjelasan pada subbab 3.4. Dengan demikian gaya prategang yang memenuhi persyaratan adalah,

$$P_{e \min} = f_{pe \min} \cdot A_C \dots \dots \dots$$

sehingga luas baja prategang yang diperlukan adalah,

$$A_{psperlu} = \frac{P_{e \min}}{f_{pse}} = \frac{f_{pe \min} \cdot A_C}{f_{pse}} \dots \dots \dots (3.3)$$

Selain ketentuan di atas, "Gerwick" telah menganjurkan suatu luas baja prategang minimum yang tidak kurang dari 0,5% penampang bruto berdasarkan teori dan pengalamannya. Jadi,

$$A_{psminimum} = 0,005 A_C$$

3.6 Kapasitas Tiang Pancang Beton Prategang

3.6.1 Kapasitas beban aksial tiang

Jika kekuatan silinder beton adalah f'_c , maka kekuatan batas beton pada tiang pancang secara aman dapat diambil sebesar $0,85.f'_c$. Pada beban batas, besar gaya prategang yang tinggal dalam tendon adalah sekitar 60% dari gaya prategang efektif. Kekuatan batasnya dapat dihitung dengan rumus:

$$P_n = (0,85 f'_c - 0,6 f_{pe}) A_c \dots\dots\dots (3.4)$$

Standar-standar yang ditetapkan oleh "Prestressed Concrete Institute" (lihat tabel 3.1) menyatakan bahwa beban tekan maksimum (P') yang diijinkan pada tiang pancang beton prategang tidak boleh melebihi nilai kapasitas dukung aksial sebagai berikut:

$$P' = (0,33 f'_c - 0,27 f_{pe}) A_c \dots\dots\dots (3.5)$$

sehingga maka didapatkan suatu faktor keamanan sebesar,

$$SF = \frac{P_u}{P'}$$

3.6.2 Kapasitas momen

Pada saat penanganan dan pengangkatan tiang pancang, maka akan timbul momen yang terjadi akibat berat sendiri tiang. Momen yang terjadi tersebut harus lebih kecil daripada momen yang mengakibatkan retak. Hal tersebut dikarenakan bahwa terjadinya retak akan menyebabkan adanya penambahan regangan pada daerah tarik yang menyebabkan Bergeraknya sumbu netral penampang ke arah bidang desak. Pada komponen struktur tekan, termasuk tiang pancang, hal tersebut menyebabkan berkurangnya kekuatan batas penampang.

Momen yang menghasilkan retak rambut pertama pada struktur beton prategang dihitung dengan teori elastik, dengan menganggap bahwa retak mulai terjadi saat tegangan tarik pada serat terluar tiang pancang mencapai modulus keruntuhannya. Untuk menghindari tercapainya nilai modulus keruntuhan pada serat terluar tiang pancang, maka tegangan tarik yang ditimbulkan saat pengangkatan harus lebih kecil daripada tegangan tarik ijin (f_{ct}) sesuai dengan ketentuan PCI (lihat tabel 3.1).

Momen yang diijinkan pada penampang tiang pancang beton prategang bisa didapatkan dengan cara meninjau tegangan yang terjadi, baik akibat gaya prategang efektif, maupun akibat momen yang terjadi saat pengangkatan. Untuk kepentingan analisis dan perhitungan, maka diperlukan kesepakatan perjanjian tanda, yaitu untuk tegangan tarik dipakai tanda positif (+), dan untuk tegangan tekan adalah negatif (-).

Dengan tidak diijinkannya keretakan akibat momen yang bekerja, maka seluruh penampang diperhitungkan efektif memikul tegangan yang timbul, sehingga seluruh luas penampang diperhitungkan dalam menentukan pusat berat dan momen inersia penampang. Dengan demikian tegangan yang terjadi dapat diperhitungkan secara elastis seperti yang akan diuraikan dibawah ini.

Pada suatu penampang tiang pancang beton prategang yang dibebani oleh gaya prategang efektif (F) dengan pusat gaya prategang berada tepat pada pusat penampang ($\Sigma e=0$), maka pada saat pengangkatan terjadi tegangan tarik pada serat terluar. Hubungan antara "tegangan tarik ijin (f_{ctu})" dan "momen yang mengakibatkan retak", diperlihatkan dalam rumus teori elastis berikut ini.

$$f_{ctu} = -\frac{F}{A_c} + \frac{M' \cdot C}{I_t} \dots \dots \dots (3.6.a)$$

Jika $f_{pe} = \frac{F}{A_c}$ maka :

$$f_{ctu} = -f_{pe} + \frac{M' \cdot C}{I_t} \dots \dots \dots (3.6.b)$$

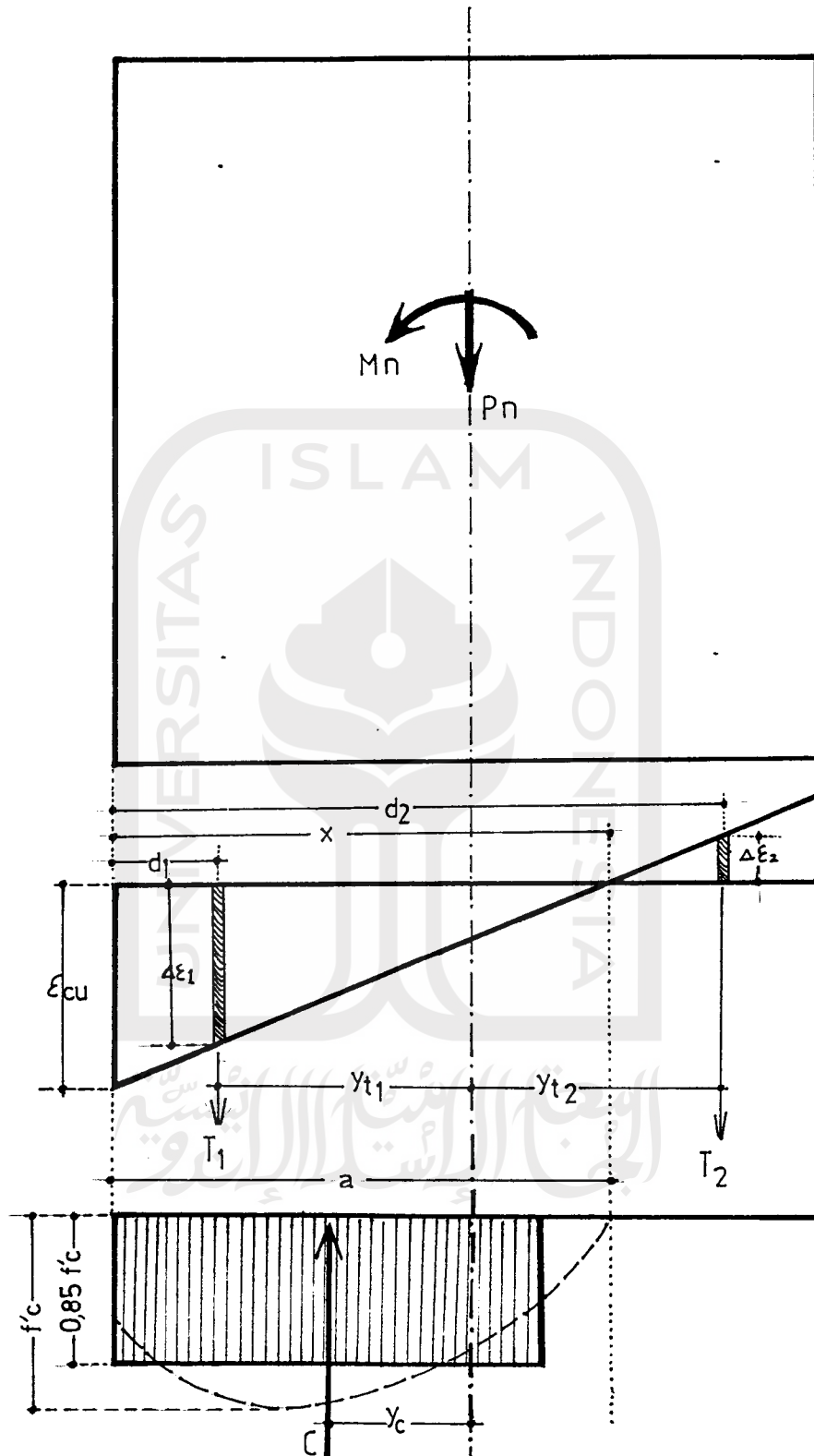
Jadi :

$$M' = (f_{ctu} + f_{pe}) \frac{I_t}{C} \dots \dots \dots (3.6.c)$$

3.6.3 Kapasitas kombinasi antara beban aksial dan momen

a. Kapasitas batas

Jikalau suatu penampang tiang pancang beton prategang menerima beban kombinasi antara beban aksial dan momen, maka kekuatan batas dapat diperkirakan dengan hubungan keseimbangan statik dari penampang, yaitu $\Sigma V=0$ dan $\Sigma M=0$ (lihat gambar 3.5).



Gambar 3.5 Kekuatan batas di bawah kombinasi beban aksial dan momen

Dari gambar 3.5 tersebut, maka :

$$\text{Untuk } EV = 0, p_n = C - T_1 - T_2 \dots \dots \dots (3.7)$$

$$\text{Untuk } EM = 0, M_n = -T_1 \cdot y_{t1} + T_2 \cdot y_{t2} + C \cdot y_c \dots \dots \dots (3.8)$$

$$\text{Eksentrisitas beban aksial, } e = \frac{M}{P} \dots \dots \dots (3.9)$$

dengan:

P_n = beban batas tiang,

M_n = momen batas,

C = resultan gaya tekan yang diterima beton,

T_1 dan T_2 = gaya tarik yang diterima penampang akibat gaya prategang efektif,

y_c = jarak antara pusat resultan tekan beton dan pusat berat penampang searah sumbu x,

y_t = jarak antara pusat gaya tarik masing-masing baja prategang searah sumbu x,

Gaya tarik yang bekerja pada penampang dapat ditentukan berdasarkan regangan yang terjadi pada baja prategang (ϵ_{ps}) saat menerima gaya eksternal sebagai berikut,

$$T = A_{ps} \cdot f_{ps} = A_{ps} \cdot E_{ps} \cdot \epsilon \dots \dots \dots (3.10)$$

dengan E_p = modulus elastisitas yang digunakan.

Regangan yang terjadi pada baja prategang saat menerima gaya eksternal terdiri dari hal-hal sebagai berikut ini.



1. Regangan akibat gaya prategang efektif (ϵ_{pe})

$$\epsilon_{pe} = \frac{f_{pse}}{E_p} \dots\dots\dots(3.11)$$

2. Regangan yang terjadi pada saat transfer.

Pada saat transfer, beton akan mengalami dekompresi, sehingga regangannya akan berkurang. Jika rekatan antara beton dan baja dianggap baik, maka regangan yang terjadi pada baja akan bertambah sebesar pengurangan regangan beton pada posisi baja, sehingga

$$\epsilon_{ce} = \frac{f_{pe}}{E_p} \dots\dots\dots(3.12)$$

3. Regangan akibat gaya eksternal

akibat adanya beban eksternal dan momen eksternal yang bekerja, maka akan menimbulkan regangan pada penampang secara linier. Pada saat beton mencapai kondisi keruntuhan, regangan pada sisi beton akan mencapai regangan beton ultimit (ϵ_{cu}), dan sumbu netral akan berada pada jarak "x" dari sisi penampang yang mengalami keruntuhan, seperti yang ditunjukkan pada gambar (3.5). Untuk itu regangan yang terjadi pada baja prategang saat beton runtuh akibat gaya-gaya eksternal dapat dihitung dengan rumus perbandingan segitiga pada diagram regangan (lihat gambar 3.5), sehingga,

$$\epsilon'_1 = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d_1-x}{x} \quad , \text{ dan}$$

$$\epsilon'_2 = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x-d_2}{x} \quad \dots\dots\dots(3.13)$$

Total regangan yang terjadi pada baja prategang diperoleh dengan menjumlahkan tegangan tegangan diatas sehingga,

$$\epsilon = \epsilon_{pe} + \epsilon_{ce} + \epsilon'$$

atau

$$\epsilon_1 = \frac{f_{pse}}{E_p} + \frac{f_{pe}}{E_c} + \epsilon_{cu} \frac{d_1-x}{x} \quad , \text{ dan}$$

$$\epsilon_2 = \frac{f_{pse}}{E_p} + \frac{f_{pe}}{E_c} - \epsilon_{cu} \frac{x-d_2}{x} \quad \dots\dots\dots(3.14)$$

total regangan yang terjadi tersebut tidak boleh melampaui regangan leleh baja (ϵ_{py}) yang diijinkan.

Dari uraian di atas, maka gaya tarik T_1 dan T_2 pada gambar (3.5) dan persamaan (3.7) serta (3.8), dapat dihitung berdasarkan regangan yang terjadi pada baja prategang, yaitu,

$$T_1 = A_{ps} \cdot f_1$$

$$= A_{ps} \cdot E_p \cdot \epsilon_1$$

$$= A_{ps} \cdot E_p \cdot [\epsilon_{pe} + \epsilon_{ce} + \epsilon_1]$$

$$T_1 = A_{ps} \cdot E_p \cdot [\frac{f_{pse}}{E_p} + \frac{f_{pe}}{E_c} + \epsilon_{cu} \cdot (\frac{d_1-x}{x})] \quad \dots\dots(3.15.a)$$

$$T_2 = A_{ps} \cdot f_2$$

$$= A_{ps} \cdot E_p \cdot \epsilon_2$$

$$\begin{aligned}
 &= A_{ps} \cdot E_p \cdot [\epsilon_{pe} + \epsilon_{ce} - \epsilon_2] \\
 &= A_{ps} \cdot E_p \cdot [\frac{f_{pse}}{E_p} + \frac{f_{pe}}{E_c} - \epsilon_{cu} \left(\frac{x-dz}{x} \right)] \\
 T_2 &= A_{ps} \cdot E_p \cdot [\frac{f_{pse}}{E_p} + \frac{f_{pe}}{E_c} + \epsilon_{cu} \left(\frac{dz-x}{x} \right)] \\
 &\dots\dots\dots(3.15.b)
 \end{aligned}$$

Selain memperhitungkan gaya tarik yang bekerja pada baja tulangan, perlu diperhitungkan pula gaya tekan yang bekerja pada beton untuk mengimbangi gaya-gaya yang bekerja baik gaya prategang maupun gaya eksternal.

Sehubungan dengan bentuk diagram tegangan tekan yang berbentuk lengkung, maka penentuan gaya tekan yang terjadi menjadi kompleks. Untuk tujuan penyederhanaan, Whitney telah mengusulkan bentuk persegi panjang sebagai bentuk tegangan beton tekan ekuivalen. Standar SKSNI-T-15-1991-03 pasal 3.3.2 ayat 7 juga menetapkan bentuk tersebut sebagai salah satu ketentuan, meskipun tidak menutup kemungkinan untuk menggunakan bentuk lain sepanjang hal tersebut merupakan hasil pengujian. Pada kenyataannya usulan Whitney telah digunakan secara luas karena mudah dalam penggunaannya, baik untuk perencanaan maupun analisis.

Berdasarkan bentuk empat persegi panjang, seperti tampak pada gambar 3.5, intensitas tegangan beton rata-rata ditentukan sebesar $0,85 f'_c$ dan dianggap bekerja pada daerah tekan dari penampang selebar b dan sedalam a . Dengan demikian maka resultan gaya tekan beton "C" adalah,

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \quad \dots\dots\dots(3.16)$$

Kedalaman daerah tekan (a) dapat ditentukan dengan rumus,

$$a = \beta_1 \cdot x \quad \dots\dots\dots(3.17)$$

dengan,

x = jarak serat tekan terluar ke garis netral,

β_1 = konstanta yang merupakan fungsi dari kuat tekan beton,

Standar SK SNI T-15-1991-03 menetapkan nilai β_1 sebesar 0,85 untuk f'_c kurang dari 30 Mpa, dan berkurang 0,008 untuk setiap kenaikan 1 Mpa kuat tekan beton, serta tidak boleh kurang dari 0,65. Jadi dapat disimpulkan bahwa,

$$\beta_1 = 0,85 - 0,008 (f'_c - 30), \text{ dan} \\ 0,65 \leq \beta_1 \leq 0,85 \quad \dots\dots\dots(3.18)$$

Dengan mensubstitusikan T_1 , T_2 dan C pada persamaan (3.15) dan (3.16) kedalam persamaan (3.7) dan (3.8), maka akan didapatkan hubungan antara P_n dan M_n dalam keadaan batas. Kombinasi antara P_n dan M_n bisa didapatkan dengan memisalkan suatu lokasi sumbu netral dan dengan mengambil ϵ_{cu} sebagai batas regangan tekan pada beton, f'_c sebagai tegangan batas beton, serta ϵ_{py} sebagai batas regangan tarik pada baja.

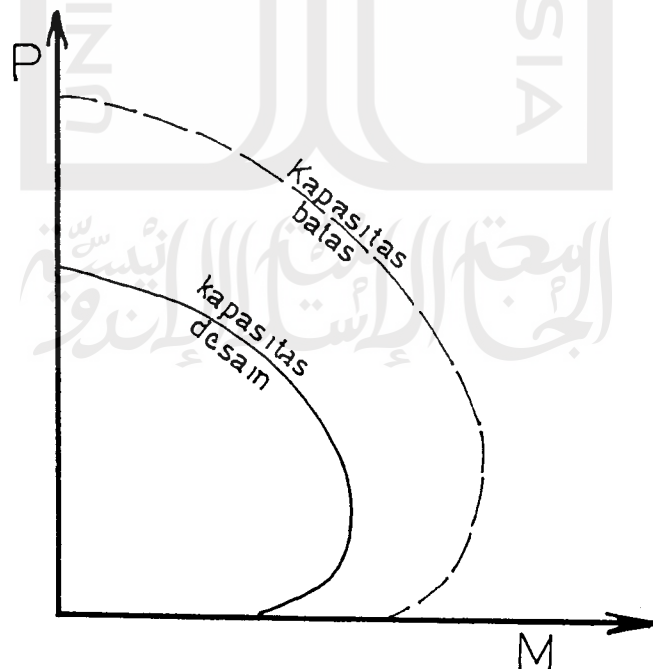
Analisis di atas harus dilakukan berulang-ulang dengan mengasumsikan berbagai letak garis netral, sehingga didapatkan suatu kurva interaksi yang menunjukkan

kapasitas batas (P_n dan M_n) dari suatu penampang (lihat gambar 3.6). Jika kurva interaksi sudah didapatkan, maka beban aksial batas dan momen batas untuk berbagai eksentrisitas beban akan dapat diketahui dengan mudah.

Untuk keperluan design, maka nilai P_n dan M_n hasil analisis diatas harus dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan " ϕ ". Berdasarkan standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 2.2.3 ayat 3, maka faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk tiang pancang sebagai struktur tekan adalah sebesar 0,65 jika menggunakan sengkang dan 0,7 jika menggunakan ikatan spiral. Jadi kapasitas yang diijinkan dari suatu penampang adalah,

$$M_R = \phi \cdot M_n, \text{ dan}$$

$$P_R = \phi \cdot P_n \dots \dots \dots (3.19)$$



Gambar 3.6 Diagram interaksi untuk beban eksentris

b. Kapasitas ijin berdasarkan tegangan oleh beban kerja

Kombinasi antara beban aksial dan momen yang diijinkan pada penampang tiang pancang beton prategang bisa didapatkan dengan cara meninjau tegangan yang terjadi, baik akibat gaya prategang efektif, beban konsentris, ataupun akibat momen eksternal.

Dengan menganggap bahwa penampang bebas retak pada tingkat beban kerja, maka seluruh penampang diperhitungkan efektif memikul tegangan yang timbul, sehingga seluruh luas penampang diperhitungkan dalam menentukan pusat berat dan momen inersia penampang. Dengan demikian maka tegangan yang terjadi dapat diperhitungkan dengan cara elastis seperti yang akan diuraikan dibawah ini.

Suatu penampang tiang pancang beton prategang yang dibebani oleh suatu gaya prategang efektif F yang bekerja secara konsentris dan dibebani dengan beban P ditambah momen eksternal M , maka tegangan pada serat terluar penampang tersebut, dapat dihitung dengan cara elastis biasa sebagai berikut.

$$f_c = - \frac{F}{A_c} - \frac{P}{A_t} \pm \frac{M.C}{I_t} \dots\dots\dots (3.20.a)$$

dengan:

A_c = luas penampang bruto (mm^2),

A_t = luas penampang transformasi tiang (mm^2),

I_t = momen inersia penampang transformasi (mm^4),

C = jarak antara sumbu netral penampang terhadap serat terluar (mm).

Rumus di atas dapat disederhanakan menjadi :

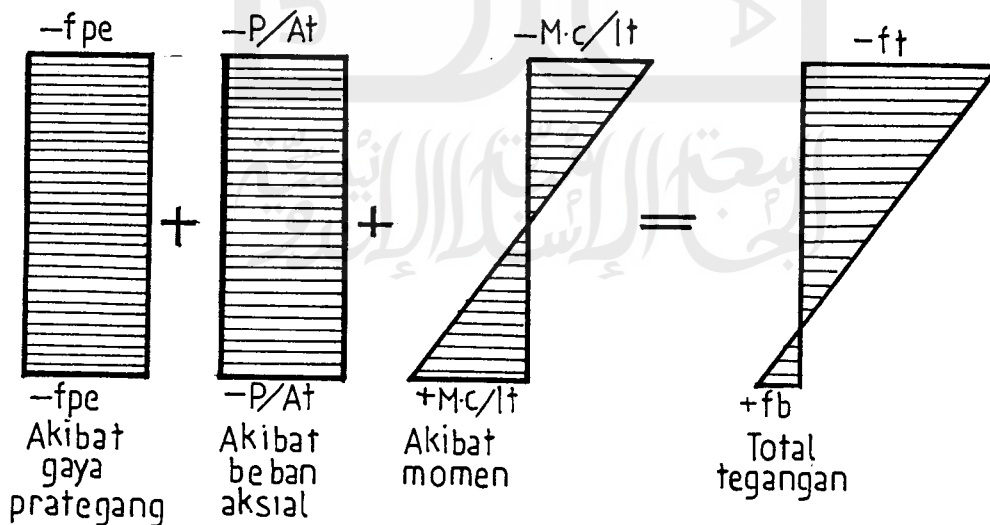
$$f_c = f_{pe} - \frac{P}{A_t} \pm \frac{M.C}{I_t} \dots\dots\dots (3.20.b)$$

dengan :

f_{pe} = tegangan beton prategang efektif persatuan luas penampang (N/mm² atau MPa)

$$= \frac{F}{A_c}$$

Tegangan yang terjadi pada penampang tersebut dapat digambarkan dalam bentuk pola tegangan seperti pada gambar (3.7.)



Gambar 3.7 Pola tegangan penampang tiang pancang beton prategang

Tegangan yang terjadi tersebut harus lebih kecil daripada tegangan tekan ijin (f_{ccu}), maupun tegangan tarik ijin (f_{ctu}) sesuai dengan tabel 3.1, sehingga momen batas (M) dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut.

1. Untuk serat tarik

$$f_c \leq f_{ctu}$$

$$-f_{pe} - \frac{P}{A_t} + \frac{M.C}{I_t} \leq f_{ctu} \dots\dots\dots(3.21.a)$$

maka :

$$M \leq (f_{ctu} + f_{pe} + \frac{P}{A_t}) \frac{I_t}{C} \dots\dots\dots (3.21.b)$$

2. Untuk serat tekan

$$f_c \leq f_{ccu}$$

$$\left| -f_{pe} - \frac{P}{A_t} - \frac{M.C}{I_t} \right| \leq |-f_{ccu}| \dots\dots\dots(3.22.a)$$

maka :

$$M \leq (f_{ccu} - f_{pe} - \frac{P}{A_t}) \frac{I_t}{C} \dots\dots\dots (3.22.b)$$

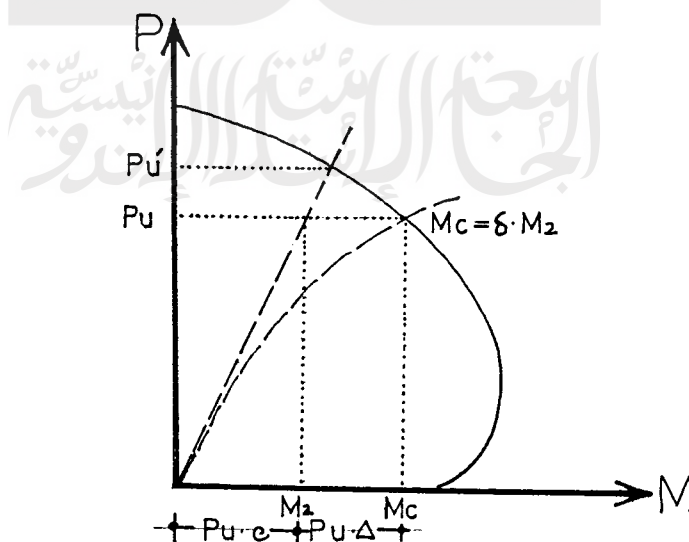
Dari uraian di atas, maka didapat dua buah momen ijin yang mampu didukung suatu penampang, yaitu momen yang dibatasi oleh tegangan tarik ijin (M_1) dan momen yang dibatasi oleh tegangan tekan ijin (M_2). Dalam perencanaan digunakan momen batas terkecil diantara keduanya.

Hubungan antara momen ijin dan beban ijin tersebut dapat pula digambarkan dalam bentuk diagram "kurva interaksi" seperti pada gambar 3.6, dengan cara mengasumsikan berbagai variasi beban P ijin

3.7 Pengaruh Kelangsingan terhadap Kapasitas Tiang

Berbagai standar dan aturan yang berlaku di dunia, termasuk diantaranya standar-standar yang ditetapkan oleh "Prestressed Concrete Institute", telah menggolongkan komponen struktur tekan menjadi dua, yaitu komponen struktur tekan langsing dan tidak langsing. Semakin langsing suatu komponen struktur tekan, maka akan semakin mudah komponen tersebut melentur, sehingga fenomena tekuk yang dialami menjadi lebih besar. Untuk mencegah tekuk yang tidak dikehendaki, diperlukan evaluasi terhadap reduksi kekuatan yang harus diberikan dalam perhitungan struktur tekan.

Suatu struktur tekan yang menahan kombinasi beban aksial dengan lentur akan mendapatkan momen lentur tambahan (momen sekunder) akibat efek $P-\Delta$ dan mengalami deformasi arah lateral (P adalah beban aksial dan Δ adalah defleksi/tekukan ke arah lateral pada penampang yang ditinjau).



Gambar 3.8 Pengaruh pembesaran momen pada diagram interaksi

Apabila ditinjau suatu struktur tekan yang menahan gaya aksial P_u dengan eksentrisitas e , dan diagram interaksinya seperti diperlihatkan pada gambar (3.8), maka tampak bahwa dengan adanya efek tekuk akan mengakibatkan momen lentur tambahan $P_u(\Delta)$. Momen lentur tambahan atau disebut momen sekunder, dengan sendirinya akan mengakibatkan kapasitas gaya normal turun atau mengecil, dari P_u' menjadi P_u . Dengan demikian jumlah momen menjadi $P_u \cdot e + P_u(\Delta)$, dan selanjutnya tinjauan kekuatan didasarkan pada momen yang sudah dibesarkan ini. Gaya P_u bekerja dengan eksentrisitas ($e + \Delta$) sehingga menghasilkan M total, dan nilai banding M total terhadap M asal disebut δ , atau Faktor pembesaran momen ("Magnification Factor"). Dengan demikian, mirip dengan yang berlaku pada analisis struktur beton bertulang biasa, standar-standar yang mengacu pada "PCI" dan "ACI Code", memberikan analisis perkiraan dengan didasarkan pada faktor pembesaran momen δ sebagai suatu evaluasi pendekatan.

Sebelum melangkah untuk memperhitungkan momen rencana yang diperbesar akibat dari kelangsingan, maka harus dilakukan pemeriksaan terlebih dahulu untuk menentukan apakah kelangsingan untuk komponen struktur tekan harus diperhatikan atau dapat diabaikan.

Dengan adanya dukungan lateral oleh tanah pada tiang pancang saat layan, maka tiang pancang dapat digolongkan sebagai struktur tekan dengan pengaku lateral. Standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.11 ayat 4, memberikan ketentuan

bahwa untuk komponen struktur tekan dengan pengaku lateral, efek kelangsingan dapat diabaikan apabila rasio kelangsingan memenuhi

$$\frac{K.L}{r} < 34 - 12 \cdot \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \dots\dots\dots(3.23)$$

dengan :

L = panjang,

r = jari-jari girasi penampang transformasi,

K = koefisien tekuk (faktor panjang efektif) tergantung pada perletakan pada kedua ujungnya.

Karena goyangan ke samping pada tiang pancang tertahan oleh dukungan lateral tanah, maka sesuai dengan ketentuan SKSNI T-15-1991-03 pasal 3.3.11 ayat 2.1, nilai "K" dapat diambil sama dengan 1. Ketentuan di atas dapat berlaku untuk tiang pancang yang ujung atasnya tidak terjepit ("unrestrained"). Untuk tiang pancang yang ujung atasnya terjepit kaku oleh poer ("restrained"), maka nilai K bisa diambil sama dengan 0,75.

M₂ pada persamaan diatas adalah momen terfaktor terbesar pada ujung komponen tekan akibat beban vertikal, sedangkan M₁ adalah momen terfaktor pada ujung lainnya.

Apabila perhitungan menunjukkan bahwa pada kedua ujung suatu komponen struktur tekan tersebut tidak terdapat momen atau bahwa eksentrisitas ujung yang didapat dari perhitungan kurang dari (15 + 0,03 h) mm, maka M₂ dalam persamaan (3.23) harus didasarkan pada eksentrisitas mini-

mum sebesar $(15 + 0,03 h)$ mm terhadap setiap sumbu utama secara terpisah.

Rasio dari M_1/M_2 pada persamaan (3.23) harus ditentukan pula dari ketentuan berikut :

- a. bila eksentrisitas ujung yang didapat dari perhitungan kurang dari $(15 + 0,03 h)$ mm, maka momen ujung yang didapat dari perhitungan boleh digunakan untuk menghitung M_1/M_2 pada persamaan (3.23),
- b. bila perhitungan menunjukkan bahwa pada dasarnya di kedua ujung dari suatu komponen struktur tekan tidak terdapat momen, maka rasio dari M_1/M_2 harus diambil sama dengan satu.

Pada pembahasan terdahulu telah disebutkan bahwa pada tiang pancang yang dipasang secara berkelompok dengan poer sebagai penghubung, momen yang terjadi pada pondasi telah terkonversi menjadi gaya aksial langsung. Hal tersebut dikarenakan "pile cap" dianggap kaku sempurna. Dengan hanya memperhitungkan gaya aksial yang bekerja, maka kapasitas untuk tiang pancang beton prategang tidak langsing pada kondisi di atas, cukup dianalisis dengan menggunakan persamaan (3.5), sehingga P yang diterima harus kurang dari P ijin.

$$P \leq [\bar{P} = (0,33 f_{c'} - 0,27 f_{pe}) A_c] \quad \dots\dots\dots(3.24)$$

Dengan terkonversikannya momen yang bekerja menjadi beban aksial langsung, maka rasio (M_1/M_2) bisa diambil sama dengan 1 sesuai ketentuan sebelumnya. Dengan demikian maka batas rasio kelangsingan menjadi,

$$\frac{K.L}{r} < \left[34 - 12 \cdot \left(\frac{M_1}{M_2} \right) = 34 - 12 \cdot 1 = 22 \right]$$

$$\frac{K.L}{r} < 22 \dots\dots\dots(3.25)$$

Jika rasio kelangsingan tiang pancang tersebut lebih dari 22 ($K.L/r > 22$), maka tiang pancang tersebut tergolong sebagai struktur tekan langsing, sehingga dalam analisisnya harus memperhitungkan adanya efek tekuk. Dengan demikian maka beban izin tiang harus pula dikontrol terhadap beban tekuk. Beban tekuk (P_e) dapat dihitung dengan rumus Euler sebagai berikut.

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \dots\dots\dots(3.26)$$

Dengan memperhitungkan faktor reduksi kekuatan (ϕ), maka beban izin tiang pancang langsing adalah,

$$P \leq \phi \cdot P_e \dots\dots\dots(3.27)$$

Khusus untuk tiang pancang dengan $(K.L/r) > 50$, maka prosedur design harus didasarkan pada kekuatan tiang dibawah kombinasi beban aksial dan momen berdasarkan rekomendasi PCI. Momen yang bekerja pada tiang pancang pada kondisi tersebut, harus didasarkan pada evaluasi pendekatan dengan pembesaran momen terfaktor yang diperhitungkan dengan eksentrisitas minimum sebesar $(15 + 0,03.h)$ mm. Dengan demikian maka momen yang bekerja

pada tiang pancang dengan $K.L/r > 50$, adalah,

$$M_c = \delta M_2 \dots\dots\dots (3.28)$$

Faktor pembesaran momen (δ) dapat ditentukan dengan rumus,

$$\delta = \frac{C_m}{1 - P_u/(\phi P_c)} \dots\dots\dots (3.29)$$

Pada persamaan (3.29) di atas, C_m adalah faktor koreksi yang ditentukan berikut ini.

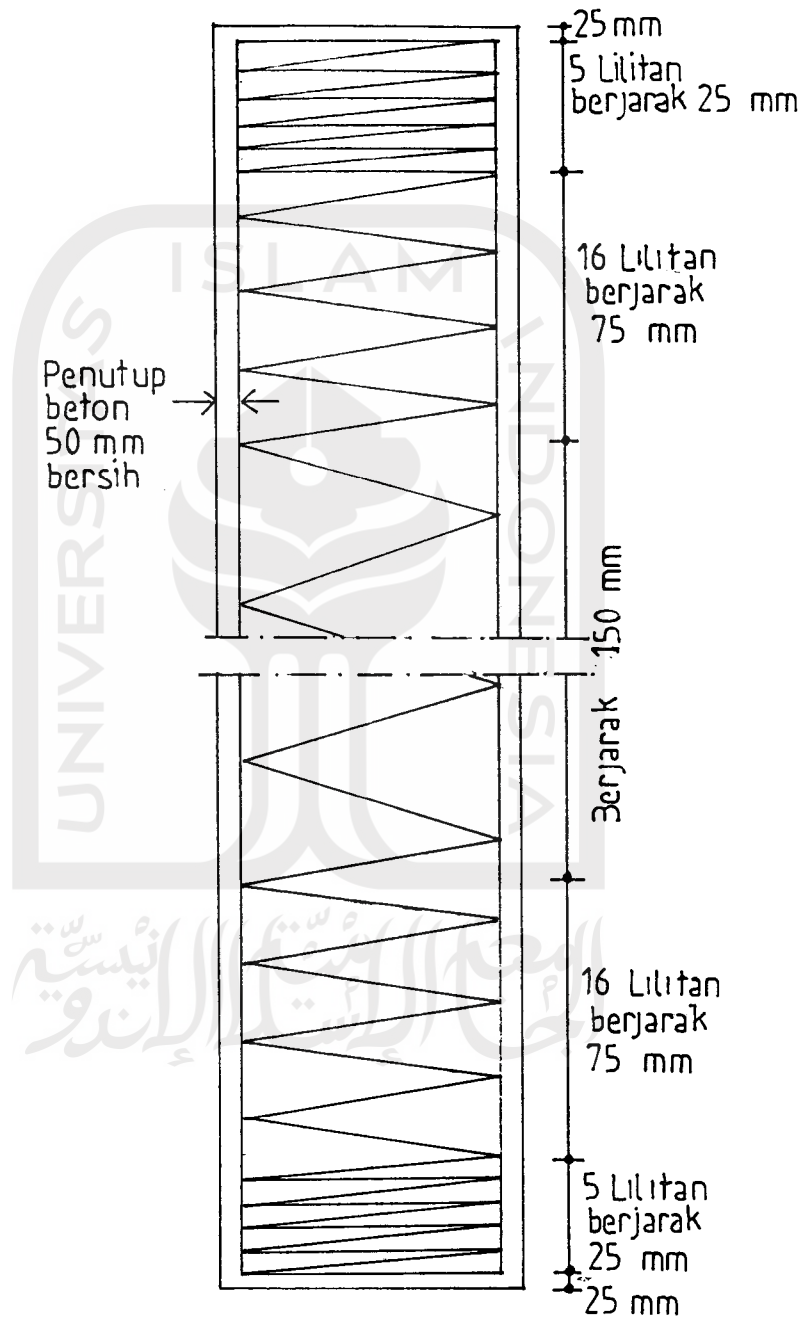
$$C_m = 0,6 + 0,4 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \dots\dots\dots (3.30)$$

Perencanaan dengan menggunakan cara perkiraan momen yang diperbesar tersebut, dapat digunakan apabila rasio kelangsingan tidak melebihi 100, sesuai dengan standar SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.11 ayat 4. Apabila $K.L/r > 100$, maka perencanaan harus menggunakan analisis struktur yang cukup rumit, dan akan lebih terjamin ketepatannya apabila menggunakan alat bantu komputer untuk memecahkan sekumpulan persamaan secara simultan.

3.8 Penulangan Spiral

Tulangan pengikat yang digunakan pada tiang pancang beton prategang umumnya adalah berupa lilitan spiral. Lilitan spiral dipasang sepanjang seluruh tiang pancang dengan jarak yang makin dekat kearah kepala dan ujung tiang pancang untuk melawan gaya pemecah yang timbul selama kondisi pemancangan. Desain lilitan spiral ini masih belum dirasionalisasikan, dan biasanya ditentukan berdasarkan pengalaman. Namun demikian, AASCHO-PCI telah

memberikan suatu rincian khas dari lilitan spiral pada tiang pancang beton prategang seperti yang ditunjukkan pada gambar (3.11).



Gambar 3.9 Rincian khas tulangan spiral berdasarkan standar AASCHO-PCI