

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tanah Ekspansif

2.1.1 Pengertian tanah ekspansif

Tanah ekspansif, dalam definisi yang sederhana, adalah tanah atau batuan yang mempunyai kemampuan untuk mengembang dan menyusut (*shrink-swell phenomena*) akibat perubahan kondisi airnya. Jika terjadi pembebanan di atas tanah dengan jenis seperti ini, misalnya oleh suatu konstruksi ringan dan jalan raya, maka akan dapat menimbulkan banyak kerugian. Volume tanah yang mengembang saat basah dan menyusut dalam kondisi kering akan mengakibatkan bangunan cepat rusak, baik oleh pergeseran, pendorongan maupun penarikan konstruksi bangunan (Wahyudi, 2005).

Dalam istilah lain, tanah ekspansif didefinisikan sebagai istilah yang digunakan pada material tanah atau batu yang mempunyai potensi penyusutan atau pengembangan oleh pengaruh perubahan kadar air. Tanah-tanah lempung banyak mengandung *montmorillonite* mengalami perubahan volume yang signifikan, ketika kadar air berubah. Pengurangan kadar air menyebabkan volume lempung menyusut dan sebaliknya bila kadar air bertambah maka volumenya pun bertambah.

Perubahan volume tanah yang besar akan merusak bangunan. Perubahan bentuk permukaan tanah akibat adanya pengembangan, akan menghasilkan permukaan yang tidak beraturan, dan tekanan pengembangan yang dihasilkan dapat mengakibatkan kerusakan serius pada perkerasan jalan yang berada di atasnya. Permukaan perkerasan yang berada di atas tanah menjadi retak-retak akibat naik-turunnya tanah, dan tekanan pengembangan yang dihasilkan dapat mengakibatkan kerusakan serius pada perkerasan jalan yang berada di atasnya.

2.1.2. Klasifikasi tanah ekspansif

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tetapi mempunyai sifat serupa kedalam kelompok-kelompok dan subkelompok-subkelompok pemakaiannya. Sebagian besar sistem klasifikasi tanah yang telah dikembangkan untuk tujuan rekayasa didasarkan pada sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran dan plastisitas. Sistem klasifikasi tanah tersebut ada bermacam-macam tetapi tidak ada satupun yang memberikan penjelasan

yang tegas mengenai segala kemungkinan pemakaiannya. Hal ini disebabkan karena sifat tanah yang bervariasi (*M. Das. Braja, 1995, Hal 64*).

Berikut adalah kriteria-kriteria dalam menentukan tingkat ekspansif tanah:

- Uji batas-batas konsistensi (*Atterberg limit*)

1. Batas cair / *Liquid limit* (LL)

Batas cair didefinisikan sebagai kadar air pada kondisi dimana tanah mulai berubah dari plastis menjadi cair atau sebaliknya yaitu batas antara keadaan cair dan keadaan plastis.

2. Batas plastis / *Plastic limit* (PL)

Batas plastis didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung.

3. Batas susut / *shrinkage limit* (SL)

Batas susut (SL) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. Percobaan batas susut dilaksanakan dalam laboratorium dengan cawan porselin diameter 44,4 mm dengan tinggi 12,7 mm. Bagian dalam cawan dilapisi dengan pelumas dan diisi dengan tanah jenuh sempurna. Kemudian diisi dengan tanah jenuh sempurna. Kemudian dikeringkan dalam oven. Volume ditentukan dengan mencelupkannya dengan air raksa. Volume ditentukan dengan mencelupkannya dengan air raksa. Batas susut dinyatakan dalam persamaan:

$$SL = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\% \right) - \left(\frac{v_1 - v_2}{m_2} \times \gamma_w \right) \times 100\%$$

Dengan :

m_1 = berat tanah basah (gr)

m_2 = berat tanah kering oven (gr)

V_1 = volume tanah basah (cm³)

V_2 = volume tanah kering oven (cm³)

γ_w = berat volume air (gr/cm³)

4. Indeks Plastisitas/ *Plasticity Index* (IP)

Indeks plastisitas tanah adalah selisih antara batas cair dan batas plastis atau perbedaan antara batas cair dan batas palstis suatu tanah. Indeks plastisitas didapat berdasarkan rumus:

$$IP = LL - PL$$

dengan: IP = indeks plastisitas

LL = batas cair

PL = batas plastis

Tabel 2.1 Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan *Linear Shrinkage* dan *Shrinkage Limit*

<i>Linear Shrinkage</i>	SL (%)	<i>Probable Swell</i>	<i>Degree Of Ekspansion</i>
< 5	> 12	< 0,5	<i>Non Critical</i>
5 – 8	10 – 12	0,5 – 1,5	<i>Marginal</i>
> 8	< 12	> 1,5	<i>Critical</i>

Sumber : Altmeyer (1955) dan Altmeyer (1955)

Tabel 2.2 Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan IP dan SL

Plasticity Index (%)	Shrinkage Limit (%)	Degree Of Ekspansion
< 12	< 15	Low
12 – 23	15 – 30	Medium
23 - 30	30 – 40	High
> 30	> 40	Very High

Sumber : Raman (1967)

Tabel 2.3 Kriteria Pengembangan Berdasarkan IP

Plasticity Index (%)	Swelling Potensial
0 – 15	Low
10 – 35	Medium
10 – 35	High
> 35	Very High

Sumber : Chen (1988)

- Uji pemadatan standar

Untuk mencari hubungan kadar air, berat volume dan untuk mengevaluasi tanah agar memenuhi persyaratan kepadatan, perlu diadakan pengujian pemadatan. Proctor (1933) telah mengamati bahwa ada hubungan yang pasti antara kadar air dan berat volume kering tanah padat. Selanjutnya terdapat satu nilai kadar air optimum tertentu untuk mencapai berat volume kering maksimumnya. Derajat kepadatan tanah diukur dari berat volume keringnya. Hubungan berat volume kering (γ_d) dengan berat volume basah (γ_b) dan kadar air (ω) dinyatakan dalam persamaan:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1 + \omega}$$

Berat volume tanah kering setelah pemadatan bergantung pada jenis tanah, kadar air, dan usaha yang diberikan oleh alat pemadatnya. Karakteristik kepadatan tanah dapat dinilai dari pengujian standar laboratorium yang disebut uji proctor.

Pada uji pemadatan standar, tanah dipadatkan dalam sebuah cetakan silinder bervolume $1/30 \text{ ft}^3$ ($=943,9 \text{ cm}^3$). Diameter cetakan tersebut adalah 4 in. ($= 101,6 \text{ mm}$). Selama percobaan di laboratorium, cetakan itu diklem pada sebuah pelat dasar dan di atasnya diberi perpanjangan (juga berbentuk silinder). Tanah dicampur air dengan kadar yang berbeda-beda dan kemudian dipadatkan dengan menggunakan penumbuk khusus. Pemadatan tanah tersebut dilakukan dalam 3 (tiga) lapisan (dengan tebal lapisan kira-kira 1,0 in.) dan jumlah tumbukan adalah 25 x setiap lapisan. Berat penumbuk adalah 5,5 lb (massa = 2,5 kg) dan tinggi jatuh sebesar 12 in. ($=304,8 \text{ mm}$).

Pada setiap percobaan besarnya kadar air dalam tanah yang dipadatkan tersebut dapat ditentukan di laboratorium. Bila kadar air tersebut diketahui, berat volume kering γ_d dari tanah tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w\%}{100}}$$

di mana w (%) = persentase kadar air.

Harga berat volume kering dari persamaan tersebut dapat digambarkan terhadap kadar air untuk mendapatkan berat volume kering maksimum dan

kadar air optimum. Untuk pengujian pemadatan tanah di laboratorium dilakukan dengan test Proctor. Dalam hal ini Proctor mendefinisikan empat variabel pemadatan tanah yaitu :

1. Usaha pemadatan atau energi pemadatan
2. Jenis tanah
3. Kadar air
4. Berat volume kering (γ_d)

Untuk suatu kadar air tertentu berat volume kering maksimum secara teoritis didapat bila pada pori-pori tanah sudah tidak ada udaranya lagi, yaitu pada saat di mana derajat kejenuhan tanah sama dengan 100%. Jadi, berat volume kering maksimum (teoritis) pada suatu kadar air tertentu dengan kondisi "zero air voids" (pori-pori tanah tidak mengandung udara sama sekali) dapat ditulis sebagai:

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + w G_s}$$

di mana:

- γ_{zav} = berat volume pada kondisi zero air voids
- γ_w = berat volume air
- w = kadar air
- G_s = berat spesifik butiran padat tanah

- Uji *free swell*

Uji *free swell* diperkenalkan oleh Holtz (1956) sebagaimana oleh dikutip Chen (1975), yaitu dengan cara memasukkan tanah lempung kering ukuran lolos ayakan no. 40 dengan volume sebesar 10cm³ kemudian dimasukkan ke dalam gelas ukur yang diisi air sebanyak 100 cm³ tanpa pembebanan. Pengamatan dilakukan setelah lempung mengendap. Perbedaan tinggi air atau volume awal pengamatan dengan akhir pengamatan menunjukkan perubahan volume material tanah. Persentase *free swell* adalah perbandingan perubahan volume tanah dengan volume tanah awal pengamatan.

- Uji Minerologi

Analisis mineralogi sangat berguna untuk mengidentifikasi potensi kembang susut tanah lempung. Identifikasi dilakukan dengan cara difraksi sinar X (*X-Ray Diffraction*).

Jika ditinjau dari mineraloginya, lempung terdiri dari berbagai mineral penyusun, antara lain mineral lempung (*kaolinite*, *montmorillonite* dan *illite group*) dan mineral-mineral lain yang mempunyai ukuran sesuai dengan batasan yang ada (*mika group*, *serpentinite group*). Mineral lempung yang menyebabkan perubahan volume umumnya mengandung *montmorillonite* atau *vermiculite*, sedangkan *illite* dan *kaolinite* dapat bersifat ekspansif bila ukuran partikelnya sangat halus.

2.1.3. Kerusakan pada tanah ekspansif

Kerusakan perkerasan jalan diatas tanah ekspansif umumnya adalah retak memanjang dan atau ambles/penurunan badan jalan. yang diperkirakan adanya kembang susut yang terjadi dibawah perkerasan. Pada musim hujan kadar air tinggi tanah mengembang. Apabila lapisan bawah ini tidak cukup kuat mendukung perkerasan akan terjadi kerusakan ambles atau penurunan dan pada musim panas dimana kadar air berkurang terjadi penyusutan akan terjadi retak. Memperhatikan tingkah laku tanah ekspansif tersebut, penanganan kerusakan dilakukan dengan menjaga agar perubahan kadar air lapisan tanah seminimum mungkin dan/atau mengubah karakteristik tanah sehingga potensi pengembangan rendah.

Dikenal beberapa metode penanganan untuk daerah tanah ekspansif seperti penggantian material ekspansif, memperbaiki karakteristik material ekspansif secara mekanis dan atau kimiawi, counterweight, pemasangan geomembran horisontal dan atau vertikal. Berdasarkan pengamatan lapangan badan jalan relatif stabil pada daerah seperti adanya pemukiman/perumahan di kiri kanan jalan, adanya lapisan aspal pada bahu jalan dan bahu yang cukup lebar, adanya tembok penahan tanah pada tepi badan jalan. Hal ini diperkirakan karena tanah dengan kadar air tetap (seimbang) badan jalan akan relatif stabil sedangkan pada tanah dasar dengan kadar air berubah-ubah naik turun badan jalan akan tidak stabil, terjadi perubahan volume, terjadi retakan ketika kering dan mengembang ketika terkena air.

Berikut ini adalah beberapa kerusakan jalan yang diakibatkan oleh perilaku tanah ekspansif :

a. Retakan

Retak pada perkerasan terjadi akibat penyusutan maupun pengembangan tanah. Retak ini merupakan retak memanjang yang dimulai dari tepi bahu jalan menuju ke tengah perkerasan. Lebar retakan bervariasi mulai dari retak rambut sampai retak berbentuk celah hingga mencapai 10 cm. Kedalaman retakan bervariasi mulai dari 1,0 cm sampai dengan kedalaman 50 cm. Retakan memanjang arah jalan disebabkan oleh retak yang terjadi pada tanah dasar, dan secara refleksi menjalar ke struktur perkerasan yang berada di atasnya dimulai dari samping perkerasan jalan

b. Pengangkatan Tanah

Pengangkatan tanah atau cembungan perkerasan jalan dapat diakibatkan oleh mengembangnya tanah ekspansif yang berada di bawah perkerasan. Cembungan ini dapat mempengaruhi struktur perkerasan sehingga menyebabkan permukaan jalan bergelombang. Pada saat-saat tertentu cembungan terjadi pada tepi perkerasan akibat pemompaan tanah dasar yang lunak oleh repetisi roda kendaraan

c. Deformasi (Penurunan)

Penurunan permukaan perkerasan jalan dapat terjadi akibat berubahnya sifat tanah dasar menjadi tanah lunak atau terjadinya pengecilan volume akibat proses penyusutan. Penurunan permukaan yang terjadi dapat mencapai kedalaman 30 cm sehingga mengganggu kelancaran pengguna jalan

d. Longsor

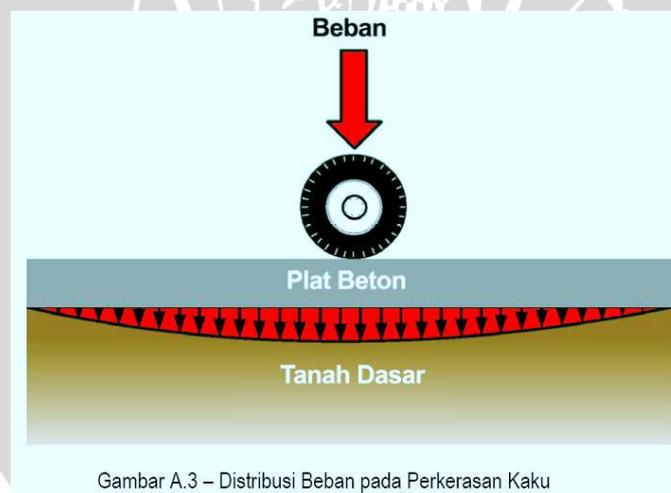
Air permukaan yang berada di atas perkerasan dapat masuk ke dalam celah yang besar, sehingga tanah menjadi jenuh air dan kadar air di dalamnya meningkat. Dengan adanya peningkatan kadar air pada tanah ekspansif, maka kuat geser tanah semakin berkurang dan akan mencapai kuat geser kritisnya. Semakin berkurangnya kuat geser tanah akan berakibat semakin berkurang pula daya dukungnya, sehingga pada saat faktor keamanan mendekati satu, tanah dasar tidak mampu lagi menahan beban di atasnya dan longsor pun tidak dapat dihindari

2.2. Perkerasan Jalan

2.2.1. Perkerasan kaku (*Rigid pavement*)

Perkerasan dimaksudkan untuk memberikan permukaan yang halus dan aman di segala cuaca, serta tebal dari setiap lapisan harus cukup untuk menjamin bahwa beban yang bekerja tidak merusakkan perkerasan atau lapisan di bawahnya. Perkerasan atau struktur perkerasan didefinisikan sebagai struktur yang terdiri dari satu lapisan atau lebih dari bahan-bahan yang diproses.

Perkerasan kaku adalah perkerasan yang menggunakan semen sebagai bahan pengikat. Beton dengan tulangan atau tanpa tulangan diletakkan di atas lapis pondasi bawah atau langsung di atas tanah dasar yang sudah disiapkan, dengan atau tanpa lapisan aspal sebagai lapis permukaan. Kekuatan perkerasan kaku ditentukan oleh kekuatan lapisan beton itu sendiri, sedangkan kekuatan tanah dasar tidak begitu menentukan. Kekuatan plat beton yang tinggi dapat memikul sebagian besar beban lalu lintas sehingga pengaruh pada daya dukung tanah dasar kecil. Gambar distribusi beban pada perkerasan kaku terdapat pada **Gambar 2.1**. Karena kekakuan pelat beton yang relatif tinggi sehingga dapat menyebarkan beban pada bidang yang luas. Tegangan yang timbul pada lapis pondasi bawah relatif kecil karena beban telah disebarkan oleh pelat beton.



Gambar 2.1 Distribusi beban pada perkerasan kaku

Sumber: DPU, 2005

Perkerasan beton mempunyai kekakuan atau modulus elastisitas yang tinggi dari perkerasan lentur. Beban yang diterima akan disebarkan ke lapisan dibawahnya sampai ke lapis tanah dasar. Dengan kekakuan beton yang tinggi, maka beban yang disalurkan tersebut berkurang tekanannya karena makin luasnya areal yang menampung

tekanan beban sehingga mampu dipikul oleh lapisan dibawah (tanah dasar) sesuai dengan kemampuan CBR. Dalam perkerasan kaku, tebal plat beton didesain agar mampu memikul tegangan yang ditimbulkan oleh beban roda kendaraan, perubahan suhu dan kadar air, serta perubahan volume yang terjadi pada lapisan dibawahnya. Untuk memikul repetisi/pengulangan pembebanan lalu lintas sesuai dengan konfigurasi sumbu dan bebannya, dalam perhitungan tebal plat beton diterapkan kelelahan (fatigue). Pada prinsipnya, perkerasan kaku didesain atas dasar:

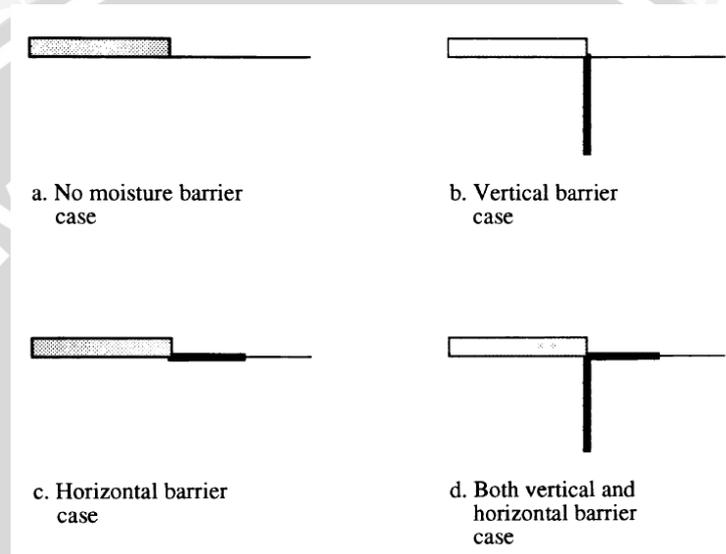
- 1) Kekuatan tanah dasar yang dinyatakan dalam modulus reaksi tanah dasar (k).
- 2) Tebal dan jenis lapisan pondasi bawah yang salah satunya untuk mendapatkan keseragaman daya dukung di bawah pelat.
- 3) Kekuatan beton yang dinyatakan dalam kekuatan lentur tarik mengingat keruntuhan pada perkerasan beton berupa retakan oleh tegangan lentur tarik yang berlebihan.

2.2.2 Analisis desain struktur perkerasan pada perubahan volume tanah

Perbedaan gaya mengembang yang dimiliki oleh tanah liat dapat menyebabkan perubahan besar pada nilai gaya geser dan momen dalam struktur pondasi. Pada perkerasan kaku dengan pengaku (*slabe-on-grade*), perbedaan gaya mengembang tadi dapat meningkatkan kemungkinan kerusakan struktur. Jika kondisi lingkungan menyebabkan gangguan kadar air tanah maka kerusakan struktural dapat lebih cepat lagi terjadi atau kerusakan struktural ini dapat berkembang secara perlahan selama bertahun-tahun sampai terjadi kerusakan. Aplikasi perkerasan kaku pada tanah dasar ekspansif harus mampu menahan tekanan pengembangan yang bekerja di bawah pelat. Menurut Surat-2011 pengembangan tanah ekspansif dapat dicegah melalui pemberian beban yang cukup besar untuk menahan tekanan mengembang. Pergerakan tanah bergantung pada kandungan airnya. Energi yang dihasilkan oleh perilaku ekspansif mampu merusak struktur jalan maka penambahan gelagar atau grade pada bagian bawah pelat (perkerasan kaku) merupakan solusi agar pelat menjadi lebih kaku lagi, kokoh dan kuat yang diharapkan bisa menahan perilaku ekspansif tanah. Ketika terjadi kenaikan kadar air akibat hujan di tepi perkerasan, bagian ini mengembang dan cenderung mengangkat pelat ke atas. Gaya ini ditahan oleh gelagar. Kekakuan pelat akibat adanya gelagar menyebabkan pelat perkerasan cenderung tetap rata. Agar efektif dan efisien

tentunya berbagai variasi gelagar perlu dicoba dan diteliti sehingga ditemukan model yang tepat guna untuk mengatasi perilaku tanah ekspansif.

Dari pengamatan yang dilakukan oleh Zekai Angin mengenai “*Estimating Structural Design Parameters For Slab-On-Grade Supported Residential And Light Comercial Structur From Fundamental Soil Moisture Changes*” dalam kasus penghalang vertikal, didapat bahwa besarnya perpindahan tanah diferensial berkurang jauh dengan bertambahnya penghalang vertikal mendalam. Variasi penghalang vertikal tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.2 Variasi penghalang vertikal perkerasan kaku

2.3. Teori Pemodelan

2.3.1 Model struktur

Secara umum model struktur dibagi menjadi 3, yakni *true model*, *adequate model* dan *distorted model*. Berikut adalah penjelasan singkat mengenai model-model tersebut :

- True model* adalah dimana persyaratan similaritas model tersebut dipenuhi semua berdasarkan prototipe yang biasa disebut *complete similarity*.
- Adequate model*. Model jenis ini hanya “*the first order similarity*“ yang dipenuhi sedangkan “*the second order similarity* “ tidak dipenuhi. Karena pengaruh “*the second order similarity*” relatif sangat kecil, maka hasil eksperimen masih cukup akurat.
- Distorted model*. Model jenis ini, salah satu atau lebih variable yang termasuk “*the first order*”, persyaratan similaritasnya tidak dipenuhi. Model jenis ini tidak disarankan dipakai.

Setiap model struktur tertentu yang dibangun didalam laboratorium memiliki faktor skala optimal geometris. Model yang terlalu kecil akan mendapatkan kesulitan yang besar pula dalam pembuatan dan instrumentasi. Sedangkan untuk model yang besar lebih mudah untuk pembuatannya tetapi juga membutuhkan peralatan beban jauh lebih berat. Pada umumnya faktor skala geometri pada pemodelan dapat dilihat pada tabel berikut.

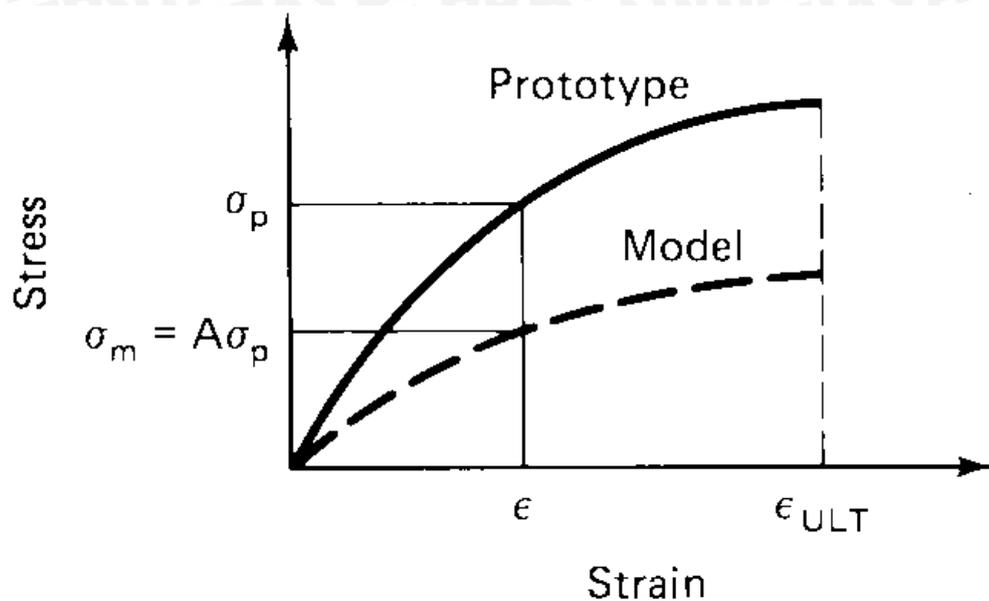
Tabel 2.4 Skala Geometri Pada Pemodelan

Type of Structure	Elastic Models	Strength Models
<i>Shell roof</i>	$\frac{1}{200}$ to $\frac{1}{50}$	$\frac{1}{30}$ to $\frac{1}{10}$
<i>Highway bridge</i>	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{20}$ to $\frac{1}{4}$
<i>Reactor vessel</i>	$\frac{1}{100}$ to $\frac{1}{50}$	$\frac{1}{20}$ to $\frac{1}{4}$
<i>Beam/slab structures</i>	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{10}$ to $\frac{1}{4}$
<i>Dams</i>	$\frac{1}{400}$	$\frac{1}{75}$
<i>Wind effects</i>	$\frac{1}{300}$ to $\frac{1}{50}$	<i>Not applicable</i>

Sumber : Harry G. and Gajanan M. dalam *Structural Modeling and Experimental Techniques*

2.3.2. Model dengan *the first order similarity*

Model dengan *the first order similarity* didifenisikan sebagai derajat model untuk kesamaan prototipe sehingga beberapa nilai dapat diabaikan. Dengan kata lain ρ_p / ρ_m dapat disama dengan satu, atau misalnya seperti perbedaan perilaku antara beban seragam dan pola diskrit diterapkan maka muatan dapat diabaikan. Hubungan antara model dengan prototipe dalam nilai tegangan dan regangan dapat digambarkan seperti gambar



Gambar 2.3 Hubungan tegangan-regangan antara model dan prototype

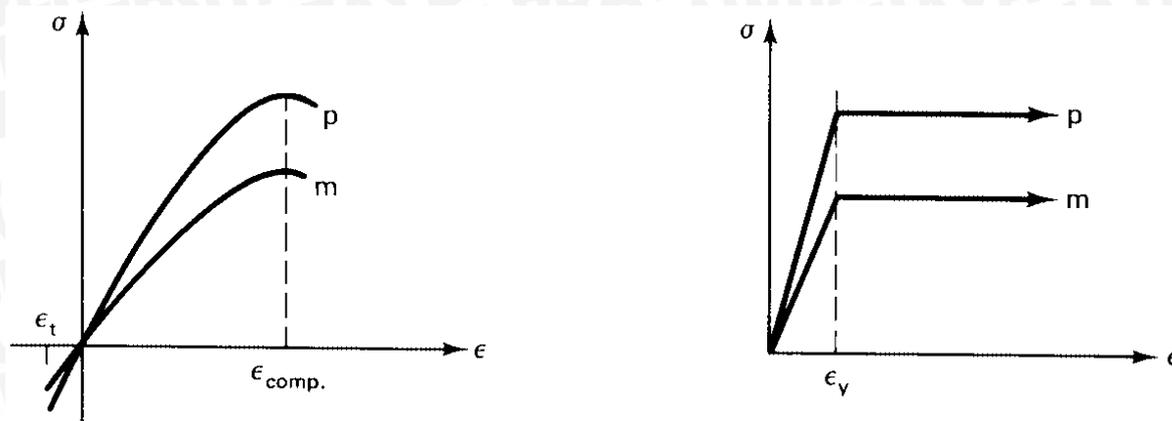
Sumber : Harry G. and Gajanan M. dalam Structural Modeling and Experimental Techniques

2.3.3. Model perkuatan beton

Tidak mudah untuk memodelkan perilaku dari elastisitas struktur beton bertulang. Kesulitan terdapat pada sifat beton bertulang yang elastis dan mempunyai kekuatan tarik dan tekan cukup besar. Kesulitan lainnya adalah dalam fase memperkuatnya, antara kekuatan material dan karakteristik kekasaran permukaan harus benar-benar diperhatikan. Karena pemodelan struktur beton bertulang biasanya mencakup pemberian beban sampai menghancurkan model maka kriteria kehancuran untuk model beton bertulang yang mengalami tegangan multiaksial harus juga identik dengan dengan beton prototipe. Tidak adanya kriteria kegagalan yang jelas biasanya menyebabkan orang untuk menghiraukan persyaratan ini, seperti diuraikan di bawah ini:

1. Kurva tegangan-regangan harus geometris serupa dalam model dan prototipe untuk beton baik tegangan *unaxial* dan kuat tekannya.
2. $\epsilon_m = \epsilon_p$ pada kondisi beton hancur akibat tekanan *unaxial* dan kuat tekannya.

Untuk membuat agar kurva tegangan dan regangan menjadi identik antara model dan prototipe kelihatannya memang tidak mungkin untuk dilakukan sehingga faktor berat jenis bahan dapat diabaikan.



(a) Concrete

(b) Reinforcement

Gambar 2.4 Perbandingan model dan prototipe antara beton dan beton dengan perkuatan

Tabel 2.5 Ringkasan Faktor Skala Model Beton Bertulang

(1)	Quantity (2)	Dimension (3)	True Model (4)	Practical True Model (5)	Distorted Model, Case 1 (Figure 2.7) (6)	Distorted Model, Case 3 (Figure 2.8) (7)
Material-Related Property	Concrete stress, σ_c	FL^{-2}	S_σ	1	S_σ	S_σ
	Concrete strain, ϵ_c	—	1	1	S_ϵ	S_ϵ
	Modulus of concrete, E_c	FL^{-2}	S_σ	1	S_σ/S_ϵ	S_σ/S_ϵ
	Poisson's ratio, ν_c	—	1	1	1	1
	Specific weight, γ_c	FL^{-3}	S_σ/S_l	$1/S_l$	S_σ/S_l	S_σ/S_l
	Reinforcing stress, σ_r	FL^{-2}	S_σ	1	S_σ	S_σ
	Reinforcing strain, ϵ_r	—	1	1	S_ϵ	S_ϵ
	Modulus of reinforcing, E_r	FL^{-2}	S_σ	1	1	1
	Bond stress, u	FL^{-2}	S_σ	1	S_σ	^a
Geometry	Linear dimension, l	L	S_l	S_l	S_l	S_l
	Displacement, δ	L	S_l	S_l	$S_\epsilon S_l$	$S_\epsilon S_l$
	Angular displacement, β	—	1	1	S_ϵ	S_ϵ
	Area of reinforcement, A_r	L^2	S_l^2	S_l^2	S_l^2	$S_\sigma S_l^2/S_\epsilon$
Loading	Concentrated load, Q	F	$S_\sigma S_l^2$	S_l^2	$S_\sigma S_l^2$	$S_\sigma S_l^2$
	Line load, w	FL^{-1}	$S_\sigma S_l$	S_l	$S_\sigma S_l$	$S_\sigma S_l$
	Pressure, q	FL^{-2}	S_σ	1	S_σ	S_σ
	Moment, M	FL	$S_\sigma S_l^3$	S_l^3	$S_\sigma S_l^3$	$S_\sigma S_l^3$

^a Function of choice of distorted reinforcing area.

Sumber : Harry G. and Gajanan M. dalam Structural Modeling and Experimental Techniques

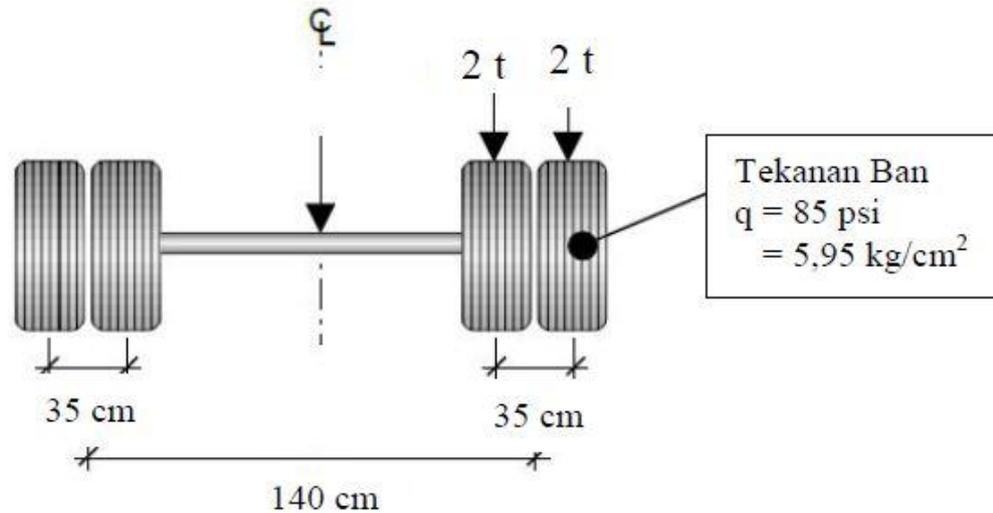
2.4. Pembebanan Pada Perkerasan Jalan

Struktur perkerasan akan mengalami lendutan pada saat menerima beban roda kendaraan (Kosasih, 2004). Secara teoritis, Kosasih (2004) menjelaskan bahwa besarnya lendutan struktur perkerasan dapat dihitung dari data komposisi dan tebal lapisan perkerasan, karakteristik bahan perkerasan (modulus elastisitas dan konstanta poisson), dan konfigurasi beban roda kendaraan.

Penyebab terjadinya kerusakan dini pada ruas-ruas jalan di Indonesia masih menjadi bahan perdebatan diantara para ahli dan pakar jalan. Tetapi disinyalir banyak pihak bahwa kerusakan-kerusakan dini tersebut kemungkinan disebabkan oleh : (1) Akibat adanya pelanggaran batas muatan maksimum yang diperkenankan; (1) Pelaksanaan pekerjaan yang tidak sesuai dengan perencanaan; dan, (3) Kurangnya pengetahuan tentang pembuatan jalan sehingga banyak faktor yang mempengaruhi perencanaan diabaikan.

Standar perencanaan Bina Marga saat ini membedakan kekuatan jalan berdasarkan beban maksimum yang lewat yakni muatan sumbu terpusat (MST) 8 ton dan 10 ton, sedangkan menurut AASHTO perencanaan tebal perkerasan berdasarkan jumlah total faktor kerusakan (*damage factor*) yang umumnya dapat dinyatakan dalam EAL (*equivalent Axle Load*). AASHTO (1972), menetapkan beban gandar standar adalah sebesar 18000 kips (8,16 ton). Beban-beban as kendaraan lainnya kemudian dikorelasikan kepada beban gandar standar untuk mendapatkan EAL dari beban tersebut. Harga EAL ini pulalah yang menunjukkan harga *damage factor* dari beban gandar kendaraan yang bersangkutan. Bila *damage factor* bagi beban gandar standar 8,16 ton melintas satu kali adalah sebesar 1 (satu), (Mochtar, 1998).

AASHTO (2003) mengatakan bahwa jumlah retak melintang di sepanjang perkerasan meningkat dengan menurunnya jarak pada ban terluar dengan jarak terluar pada perkerasan (sambungan longitudinal) disepanjang jalan yang dilalui oleh truk.



Gambar 2.5 Desain axle load standard. axle load = 80 kN = 8,16 ton

2.4.1 Beban gandar kendaraan

Beban gandar kendaraan adalah beban total kendaraan yang didistribusikan pada gandar masing-masing kendaraan dan ditanggung sepenuhnya oleh roda kendaraan. Sementara itu, Irmawan dan Mochtar (1990), menjelaskan bahwa komposisi beban gandar dibagi menjadi tiga macam yakni gandar tunggal (*single axle*). Gandar ganda (*tandem axle*) dan gandar tiga (*tridem axle*). Pada penelitian berikutnya, Mochtar (1999), membagi komposisi beban gandar tunggal satu roda (*single axle single tire/SAST*), gandar tunggal dengan dua roda (*single axle dual tire/SADT*), gandar ganda dengan dua roda (*tandem axle dual tire/TADT*) dan gandar tiga dengan dua roda (*triple axle dual tire/TRDT*). Sedangkan klasifikasi jalan berdasarkan beban gandar yang diijinkan lewat adalah seperti yang termuat dalam Peraturan Pemerintah no. 5 tahun 1964, *Tentang Lalu Lintas Nasional (PPLLN)*.

Tabel 2.6 Hubungan Antara Kelas Jalan Dengan Beban Gandar

Kelas Jalan	Beban Gandar Maksimum (Ton)
I	7,0
II	5,0
III	3,5
IIIA	2,75
IV	2,0
V	1,5

2.4.2 Beban lalu lintas

Untuk mengatasi permasalahan terjadinya *over/under design*, maka dalam tahap perencanaan diperlukan nilai beban lalu lintas yang akan digunakan sebagai dasar

penentuan tebal perkerasan jalan. Nilai beban lalu lintas tersebut harus diambil sesuai kendaraan aktual yang beroperasi di jalan khususnya kendaraan angkutan barang. Perkembangan angkutan barang seperti kontainer, angkutan pengangkut hasil produksi, dan pengangkut peralatan konstruksi, mengakibatkan saat ini terdapat berbagai jenis kendaraan yang memiliki sumbu lebih dari dua. Pedoman yang dikeluarkan oleh Bina Marga pada Buku Manual Pemeriksaan Perkerasan Jalan dengan alat *Benkelman Beam* No.01/MN/BM/83, mengenai persentase distribusi beban sumbu untuk berbagai jenis kendaraan tidak bisa dijadikan sebagai acuan penuh dalam perancangan jalan, dikarenakan pedoman tersebut dikeluarkan oleh Bina Marga pada tahun 1983.

Jenis kendaraan yang dipaparkan sangat terbatas dan tidak bisa dijadikan sebagai acuan untuk perancangan jalan saat ini, oleh karena itu dalam tugas akhir ini akan dilakukan studi mengenai persentase pendistribusian beban kendaraan untuk konfigurasi sumbu ganda roda ganda atau disebut tandem dengan konfigurasi sumbu 1.22-22 dan kendaraan dengan konfigurasi sumbu tripel roda ganda atau disebut tridem dengan konfigurasi sumbu 1.22-222 yang aktual beroperasi di jalan.

2.4.2.1 Beban berlebih

Beban berlebih (*overloading*) adalah suatu kondisi beban gandar (as) kendaraan melampaui batas beban maksimum yang diijinkan (*Hikmat Iskandar, Jurnal Perencanaan Volume Lalu-lintas Untuk Angkutan Jalan, 2008*).

Beban berlebih (*overloading*) adalah beban lalu-lintas rencana (jumlah lintasan operasional rencana) tercapai sebelum umur rencana perkerasan, atau sering disebut dengan kerusakan dini (*Hikmat Iskandar, Jurnal Perencanaan Volume Lalu-lintas Untuk Angkutan Jalan, 2008*).

2.5. Lendutan dan Tegangan Pada Tanah

2.5.1. Lendutan tanah

Bila suatu lapisan tanah mengalami pembebanan akibat beban di atasnya, maka tanah di dibawah beban yang bekerja tersebut akan mengalami kenaikan tegangan, eksek dari kenaikan tegangan ini adalah terjadinya penurunan elevasi tanah dasar (*settlement*). Pembebanan ini mengakibatkan adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel tanah, dan keluarnya air pori dari tanah yang disertai berkurangnya volume tanah. Hal inilah yang mengakibatkan terjadinya penurunan tanah.

Pada umumnya tanah, dalam bidang geoteknik, dibagi menjadi 2 jenis, yaitu tanah berbutir dan tanah kohesif. Pada tanah berbutir (pasir/*sand*), air pori dapat mengalir keluar struktur tanah dengan mudah, karena tanah berbutir memiliki permeabilitas yang tinggi. Sedangkan pada tanah kohesif (*clay*), air pori memerlukan waktu yang lama untuk mengalir keluar seluruhnya. Hal ini disebabkan karena tanah kohesif memiliki permeabilitas yang rendah.

Secara umum, penurunan dapat diklasifikasikan menjadi 3 tahap, yaitu :

- *Immediate Settlement* (penurunan seketika), diakibatkan dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air, tanpa adanya perubahan kadar air. Umumnya, penurunan ini diturunkan dari teori elastisitas. *Immediate settlement* ini biasanya terjadi selama proses konstruksi berlangsung. Parameter tanah yang dibutuhkan untuk perhitungan adalah undrained modulus dengan uji coba tanah yang diperlukan seperti SPT, sondir (*dutch cone penetration test*), dan *pressuremeter test*.
- *Primary Consolidation Settlement* (penurunan konsolidasi primer), yaitu penurunan yang disebabkan perubahan volume tanah selama periode keluarnya air pori dari tanah. Pada penurunan ini, tegangan air pori secara kontinyu berpindah ke dalam tegangan efektif sebagai akibat dari keluarnya air pori. Penurunan konsolidasi ini umumnya terjadi pada lapisan tanah kohesif (*clay* / lempung)
- *Secondary Consolidation Settlement* (penurunan konsolidasi sekunder), adalah penurunan setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Hal ini lebih disebabkan oleh proses pemampatan akibat penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.

2.5.2. Penurunan seketika (*Immediate Settlement*)

Penurunan seketika / penurunan elastis terjadi dalam kondisi *undrained* (tidak ada perubahan volume). Penurunan ini terjadi dalam waktu yang sangat singkat saat dibebani secara cepat. Besarnya penurunan elastis ini tergantung dari besarnya modulus elastisitas kekakuan tanah dan beban timbunan diatas tanah.

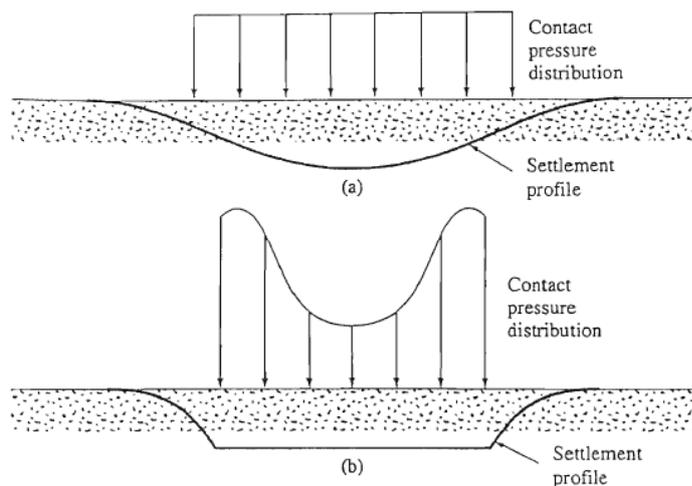


Figure 10.1 Immediate settlement profile and contact pressure in clay: (a) flexible foundation; (b) rigid foundation

Gambar 2.6 Penurunan seketika

2.5.3. Tegangan tanah

Tegangan di dalam tanah yang timbul akibat adanya beban permukaan dinyatakan dalam istilah tambahan tegangan (*stress increment*), sebab sebelum tanah dibebani, tanah sudah mengalami tekanan akibat beratnya sendiri yang disebut *overburden*.

Analisis tegangan di dalam tanah didasarkan pada anggapan bahwa tanah bersifat elastis, homogen, isotropi, dan terdapat hubungan linier antara tegangan dan regangan. Dalam analisisnya, regangan volumetrik pada bahan yang bersifat elastis dinyatakan oleh persamaan :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1-2\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

Dengan :

ΔV = perubahan volume

V = volume awal

μ = angka poisson

E = modulus elastic

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = tegangan-tegangan dalam arah x,y, dan z

Dalam persamaan (1), bila pembebanan yang mengakibatkan penurunan, terjadi pada kondisi tak terdrainase (*undrained*) atau penurunan terjadi pada volume constant, maka $\Delta V/V = 0$. Dalam kondisi ini angka poisson $\mu=0,5$. Jika pembebanan menyebabkan perubahan volume (contohnya penurunan akibat proses konsolidasi), sehingga $\Delta V/V \neq 0$, maka $\mu < 0,5$

- Beban terbagi rata berbentuk empat persegi panjang (Teori *Boussinesq*)

Tambahan tegangan vertikal beban terbagi rata berbentuk empat persegi panjang, dengan ukuran L dan lebar B (**Gambar 2.7**) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang diperoleh dari hasil penjabaran teori *Boussinesq*, sebagai berikut:

$$\Delta\sigma_z = qI$$

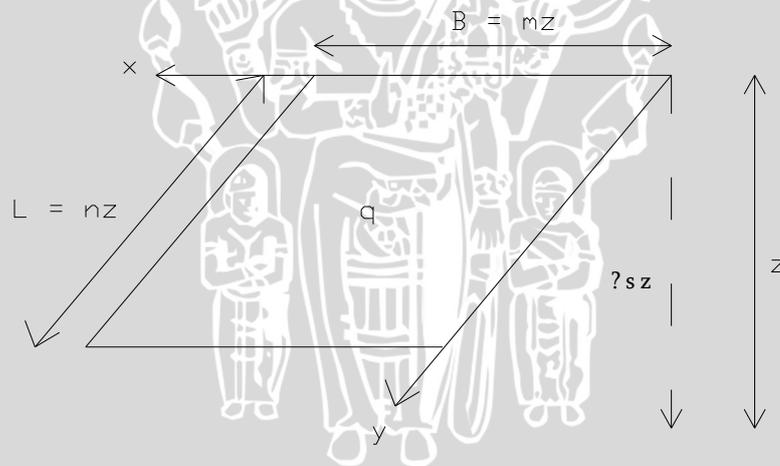
dan

q = tegangan akibat beban pondasi

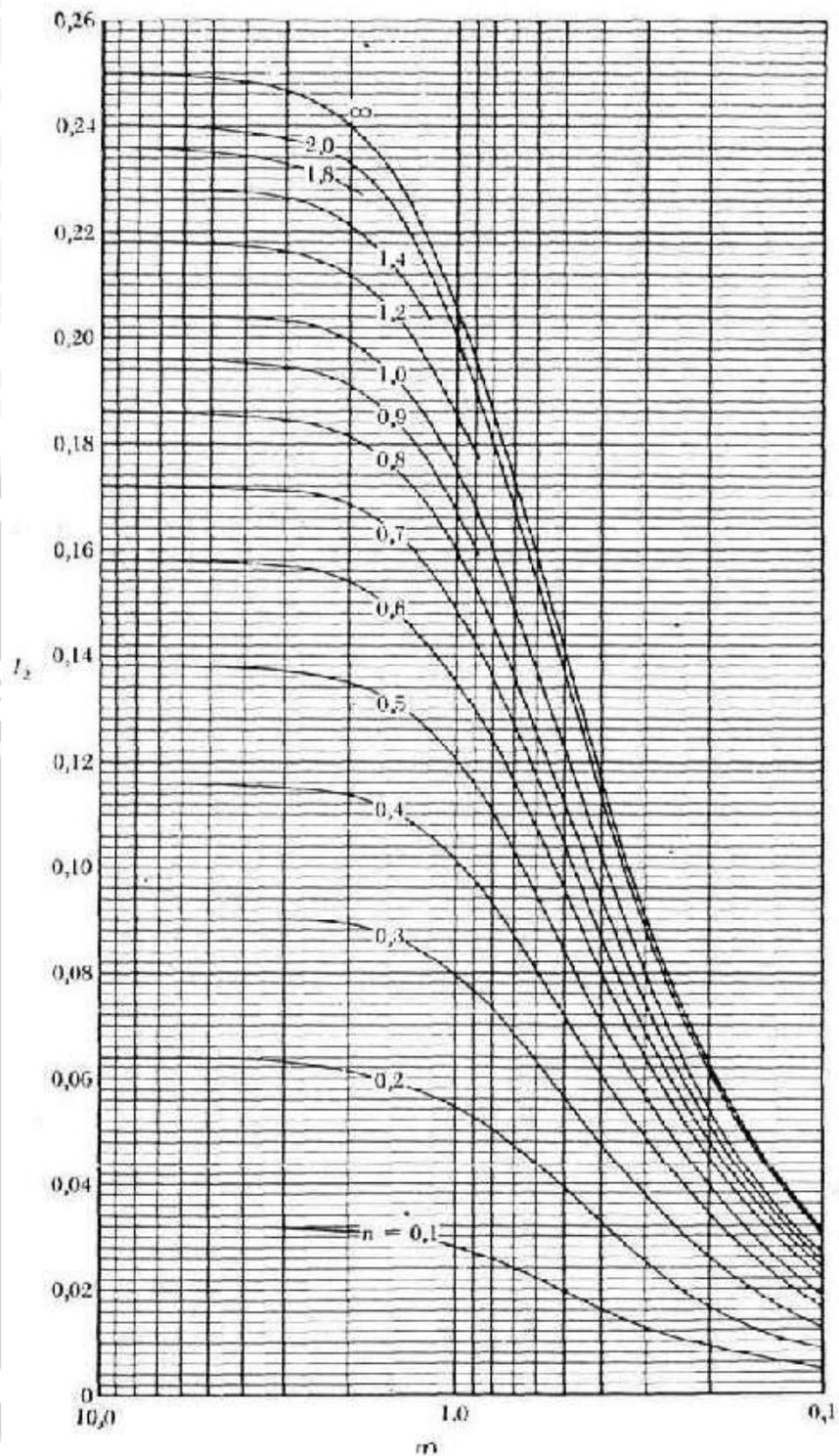
$$m = \frac{B}{z}$$

$$n = \frac{L}{z}$$

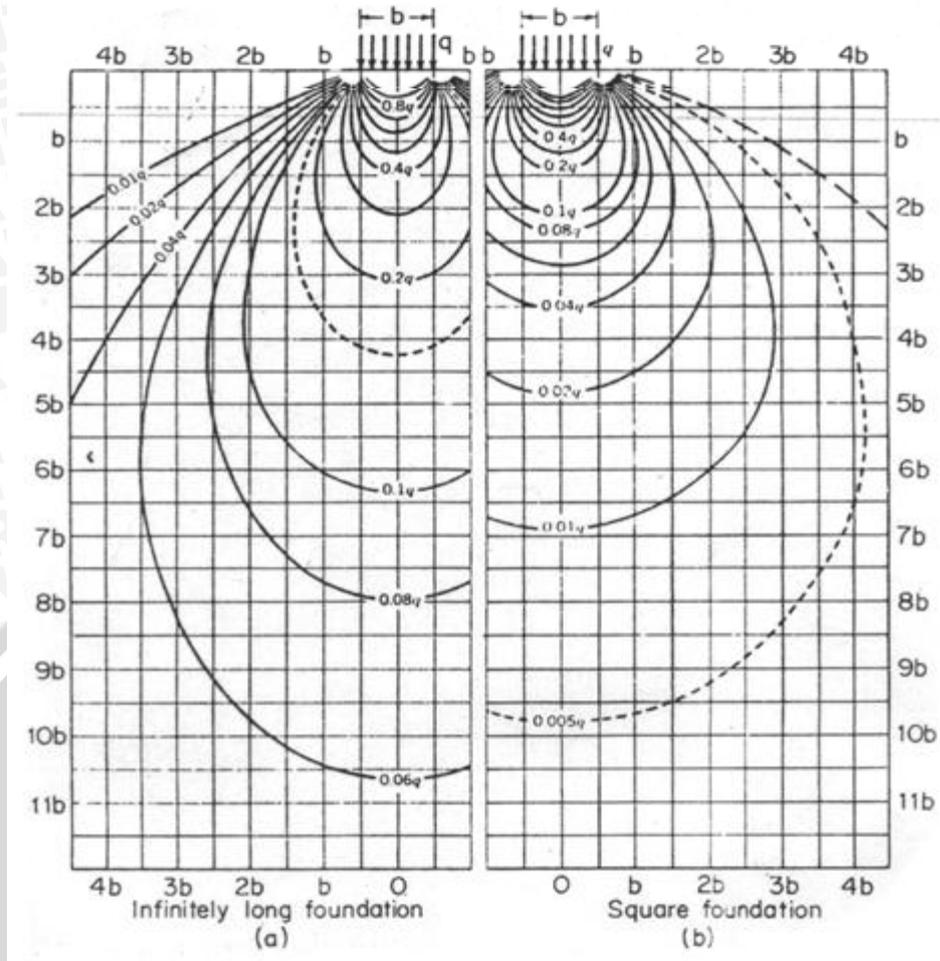
Nilai factor pengaruh I untuk tegangan di bawah sudut luasan empat persegi panjang yang menderita beban terbagi rata q dalam bentuk grafik, dapat dilihat dalam **Gambar 2.8**



Gambar 2.7 Tegangan di bawah beban terbagi rata berbentuk empat persegi panjang



Gambar 2.8 Faktor pengaruh I untuk tegangan vertikal di bawah sudut luasan empat persegi panjang yang menderita beban terbagi rata (U.S Navy, 1971)



Gambar 2.9 Isobar tegangan untuk beban terbagi rata berbentuk lajur memanjang dan bujur sangkar didasarkan teori *Boussinesq*

