STUDI TENTANG PERILAKU PELAT BETON DI ATAS TANAH GAMBUT UNTUK PENGEMBANGAN JALAN BETON DI PONTIANAK

M. Yusuf [1)], Vivi Bachtiar [1)], dan Siti Mayuni [1)]

Abstrak

Sebagian besar tanah permukaan di Kota Pontianak merupakan tanah gambut yang cukup tebal. Dari sudut pandang teknik sipil, tanah gambut mempunyai sifat-sifat mekanis yang tidak menguntungkan. Hal ini merupakan problema bagi para praktisi konstruksi gedung, jalan, dan jembatan di Kalimantan Barat pada umumnya. Sering dijumpai kegagalan konstruksi jalan menunjukkan bahwa para praktisi masih belum berhasil dengan memuaskan mengatasi rendahnya daya dukung tanah di daerah ini. Tulisan ini bermaksud memberikan kontribusi untuk memecahkan masalah tersebut melalui simulasi program komputer. Variabel yang ditinjau adalah *B* (panjang sisi pelat bujur sangkar). Dari hasil studi ini didapat hubungan antara *q* (tekanan tanah) dan *d* (deformasi tanah). Dari hubungan *q* dan *d* diperoleh hubungan *P* (beban) dan *d*. Dari hubungan *P* dan *d* diperoleh hubungan P_u (beban ultimit) dan *B*. Dari hubungan *q* dan *d* diperoleh hubungan *k* (modulus reaksi tanah dasar) dan *d*. Dari hubungan *k* dan *d* diperoleh nilai k_1 (*k* pada penurunan 1 inci) dan *B*. Dalam beberapa tabel ataupun monograf yang menyajikan nilai *k* dari berbagai literatur, nilai *B* jarang muncul untuk menentukan nilai k_1. Dari hasil studi ini, grafik k_1 dan *B* dengan jelas menggambarkan nilai k_1 semakin mengecil seiring dengan membesarnya nilai *B*. Untuk pelat berukuran 1,2m×1,2m diperoleh nilai k_1 sebesar 0,144 MN/m^3.

Kata-kata kunci: pelat beton, modulus reaksi tanah dasar, program komputer, tanah gambut

1. PENDAHULUAN

Perhitungan struktur beton di atas tanah sangat kompleks, dikarenakan kedua materialnya (beton dan tanah) mempunyai sifat dasar yang nonlinier. Solusi analitik maupun studi numerik tentang perilaku pelat beton di atas tanah telah banyak dilakukan dengan mengasumsikan tanah sebagai material yang berperilaku elastis linier. Studi yang memperhitungkan sifat nonlinieritas tanah masih jarang dilakukan.

Studi numerik tentang perilaku pelat beton di atas fondasi elastis yang memperhitungkan sifat nonlinieritas beton dan tanah dapat dijumpai dalam Yusuf (2002). Hasil verifikasi dengan membandingkan hasil studi numerik dalam Yusuf (2002) dan hasil studi eksperimental dalam Falkner *et al* (1995) memberikan hasil yang cukup memuaskan jika diambil *modulus of subgrade reaction* bernilai konstan. Studi eksperimental juga telah dilakukan Yusuf dan Vivi (2005) dalam skala kecil di atas tanah pasir, Yusuf dan Vivi (2006) dalam skala kecil di atas tanah lempung, Yusuf (2008b) dalam skala penuh di tanah lempung, dan Vivi dan Yusuf (2008) dan Yusuf (2008a) dengan penambahan tiang cerucuk di tanah lempung. Berdasarkan studi eksperimental tersebut didapatkan ada kesesuaian antara program komputer yang dikembangkan dengan hasil eksperimental.

1) Staf pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura

Aplikasi pelat beton di atas tanah cukup banyak. Yang ditinjau dalam penelitian ini adalah pelat beton di atas tanah sebagai perkerasan kaku (*rigid pavement*). Penelitian ini perlu dilakukan mengingat standar peraturan tentang pelat beton di atas tanah belum diatur dalam peraturan beton Indonesia. Selama ini perencanaan jalan beton (pelat beton di atas tanah) banyak mengacu kepada standar/peraturan luar negeri (Hendarsin, 2000; Alamsyah, 2003; Suryawan, 2005). Karakteristik tanah di Indonesia pada umumnya, dan karakteristik tanah gambut di Pontianak pada khususnya, berbeda dengan karakteristik tanah negeri asal standar/peraturan tersebut. Karena itu, perbendaharaan data hasil penelitian untuk perencanaan pelat beton di atas tanah perlu lebih dikembangkan.

Idealisasi tanah sebagai material yang elastis linier merupakan salah satu faktor penyebab terjadinya kegagalan (*failure*) pada pelat beton di atas tanah. Karena itu, untuk memperoleh hasil perencanaan yang lebih baik, perlu diperhitungkan sifat dasar material tanah yang digunakan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan perilaku mekanik pelat beton di atas tanah gambut berupa hubungan beban versus penurunan pelat berdasarkan simulasi program komputer.

2. DASAR TEORI

Dari teori pertambahan tegangan vertikal Boussinesq akibat pembebanan titik di permukaan, Newmark (1935) (dalam Das, 1999) telah menurunkan rumus pertambahan tegangan vertikal σ_v pada kedalaman y di tepi luasan persegi sebagai

$$\sigma_v = qI \tag{1}$$

di mana q adalah tekanan permukaan dan I adalah faktor pengaruh. Steinbrenner telah menurunkan faktor pengaruh I untuk di tengah pelat sebagai (Das, 1999):

$$I = \frac{2}{\pi}\left[\frac{st}{\sqrt{1+s^2+t^2}} \times \frac{1+s^2+2t^2}{(1+t^2)(s^2+t^2)}\right] + \arcsin\frac{s}{\sqrt{s^2+t^2}\sqrt{1+t^2}} \tag{2}$$

di mana B dan L adalah panjang dan lebar pelat, sedangkan

$$s = L/B \tag{3}$$

dan

$$t = \frac{y}{B/2} \tag{4}$$

Untuk memperoleh diagram q (tekanan tanah) dan d (deformasi tanah), dilakukan dengan pendekatan secara numerik dengan *load control* seperti dalam Yusuf (2008). Rumus-rumus yang digunakan adalah

$$d_i = \sum_{j=1}^{n} \Delta\delta_j \tag{5}$$

$$\Delta\delta_j = \varepsilon_j \, \Delta h_j \tag{6}$$

$$\varepsilon_j = f(\sigma_{vj}) \quad (7)$$

$$\sigma_{vj} = q_i I_j \quad (8)$$

$$I_j = \frac{2}{\pi}\left[\frac{st_j}{\sqrt{1+s^2+t_j^2}} \times \frac{1+s^2+2t_j^2}{(1+t_j^2)(s^2+t_j^2)}\right] + \arcsin\frac{s}{\sqrt{s^2+t_j^2}\sqrt{1+t_j^2}} \quad (9)$$

$$t_j = \frac{y_j}{B/2} \quad (10)$$

di mana

d_i : deformasi tanah akibat beban sebesar q_i.

q_i : tekanan tanah pada inkremental ke-i.

$\Delta\delta_j$: deformasi tanah pada lapisan ke-j.

n : jumlah pembagian lapisan tanah.

Δh_j : tebal lapisan tanah ke-j.

ε_j : regangan tanah untuk lapisan ke-j yang dibaca dari data tegangan dan regangan (*constitutive bahavior*) tanah pada tegangan sebesar σ_{vj}.

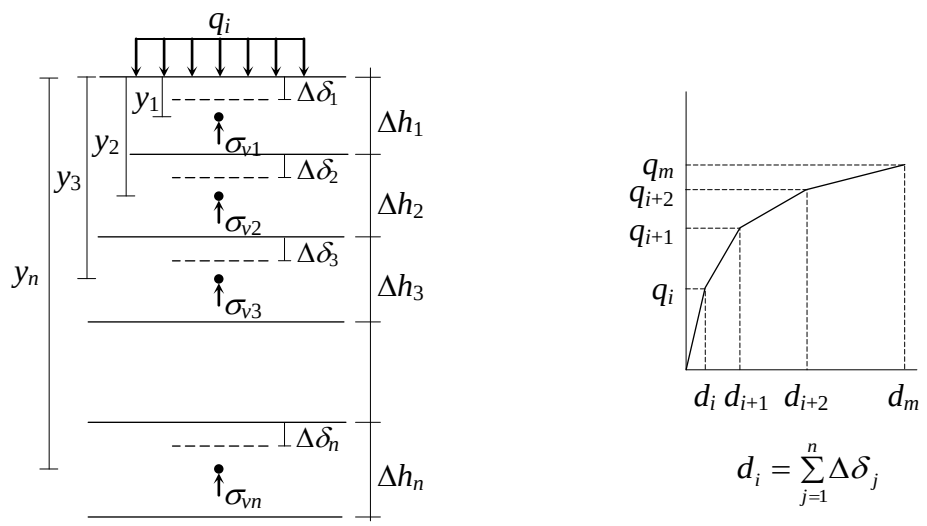
σ_{vj} : pertambahan tegangan pada lapisan ke-j.

I_j : faktor pengaruh pada lapisan ke-j.

y_j : kedalaman lapisan ke-j.

Prosedur untuk mendapatkan kurva q dan d dilakukan sebagai berikut:

1) Kedalaman tanah dibagi atas



(a) Pembagian kedalaman tanah atas beberapa lapisan elastis

(b) Diagram tekanan versus deformasi

Gambar 1 Pendekatan mendapatkan kurva *q* dan *d*

beberapa lapisan elastis seperti pada Gambar 1(a) sehingga diperoleh Δh_j, y_j, dan n.

2) Tentukan nilai m yaitu jumlah titik koordinat (d, q) yang diinginkan untuk menggambar kurva q dan d.
3) Tentukan nilai q_i dengan

$$q_i = q_{i-1} + \Delta q \qquad (11)$$

di mana Δq adalah pertambahan tekanan tanah yang bernilai konstan untuk setiap inkremental.

4) Hitung nilai t_j dengan Persamaan (10).
5) Hitung faktor pengaruh I_j dengan Persamaan (9).
6) Hitung pertambahan tegangan vertikal σ_{vj} dengan Persamaan (8).
7) Dari data tegangan dan regangan tanah, tentukan regangan ε_j untuk tegangan sebesar σ_{vj}.
8) Hitung deformasi $\Delta\delta_j$ dengan Persamaan (6).
9) Ulangi langkah (4) – (8) untuk j+1 (lapisan tanah berikutnya).
10) Hitung deformasi tanah seluruh lapisan dengan Persamaan (5).
11) Plot nilai q_i dan d_i pada Gambar 1(b).
12) Ulangi langkah (3) – (11) untuk q_{i+1}.

Untuk mendapatkan kurva hubungan P (beban) dan d maka P dihitung sebagai

$$P_i = q_i A \qquad (12)$$

di mana A adalah luas bidang pelat. Karena nilai A konstan maka bentuk tipikal kurva q dan d akan sama dengan kurva P dan d.

Modulus reaksi tanah dasar (k) adalah salah satu besaran yang harus didapatkan dalam perencanaan jalan beton. Dalam berbagai literatur, nilai k yang disajikan dalam tabel maupun monograf selalu berupa rentang nilai yang mengaitkan nilai k dengan jenis tanah, sifat mekanis tanah, klasifikasi tanah, ataupun CBR, tanpa mengaitkan dengan dimensi pelat (Yusuf, 2006; Sapar, 2006). Sejauh ini belum terdapat (sulit ditemukan) usulan (rekomendasi) nilai k untuk tanah gambut.

Menurut definisinya, k adalah perbandingan antara tekanan tanah terhadap deformasinya, yang dapat ditentukan dengan metode tangen ataupun dengan metode sekan. Dengan kurva hubungan q dan d yang diperoleh seperti pada Gambar 1(b) maka dapat ditentukan dengan mudah hubungan k dan d. Dengan metode sekan maka k tersebut adalah

$$k = q/d \qquad (13)$$

Jika k dihitung dengan metode sekan, Bowles (1996) menyarankan nilai k diambil pada penurunan 1 inci (25,4mm) yang dalam studi ini dinotasikan sebagai k_1.

Pada program komputer yang dikembangkan dalam studi ini, besaran yang menjadi input program adalah B, L, H (tebal total lapisan tanah yang diperhitungkan), n, m, Δq, dan hubungan tegangan dan regangan (*constitutive behavior*) tanah. Hubungan tegangan dan regangan tanah dapat berupa data diskrit ataupun berupa persamaan konstitutif dalam bentuk

$$\varepsilon = f(\sigma_d) \quad (14)$$

yaitu ε dalam fungsi σ_d di mana ε adalah regangan aksial tanah dan σ_d adalah tegangan deviatorik tanah. Jika digunakan data diskrit maka nilai ε yang ke-*j* dapat ditentukan dengan interpolasi linier sebagai berikut:

$$\varepsilon_j = \frac{[(\sigma_v)_j - (\sigma_d)_{u-1}](\varepsilon_{u-1} - \varepsilon_u)}{(\sigma_d)_{u-1} - (\sigma_d)_u} + \varepsilon_{u-1} \quad (15)$$

di mana *u* adalah nomor urut data diskrit tegangan dan regangan tanah yang memenuhi

$$(\sigma_d)_{u-1} < (\sigma_v)_j \le (\sigma_d)_u \quad (16)$$

Dalam literatur geoteknik, tidak banyak tersedia mengenai metode interpretasi beban ultimit hasil uji pembebanan pelat di lapangan. Metode standar yang biasa digunakan adalah metode tangen yang merupakan metode grafis. Karena grafik hubungan *P* dan *d* diperoleh secara numerik maka P_u lebih baik didekati dengan cara numerik pula.

Hadi dan Yusuf (2007) telah mengembangkan program komputer untuk menginterpretasi beban ultimit berdasaarkan grafik *P* dan *d* dengan metode Van der Veen yaitu memecahkan persamaan

$$d = -\frac{1}{c}\ln\left(1 - \frac{P}{P_u}\right) \quad (17)$$

di mana *c* adalah sembarang konstanta. Metode ini merupakan kombinasi antara hitungan dan grafis yang dilakukan secara *trial and error*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Sampel Tanah Gambut

Dari hasil boring, tanah gambut yang dijadikan sampel data mempunyai ketebalan lebih dari 4m. Dari hasil tes triaksial, sifat-sifat mekanis sampel tanah gambut disajikan pada Tabel 1. Data tegangan dan regangan tanah disajikan pada Gambar 2. Dengan program CurveExpert v1.3 dilakukan *curve fitting* sehingga diperoleh model *exponential association* sebagai berikut

$$\sigma_d = 0{,}087845(1 - e^{-31{,}0088\varepsilon}) \quad (18)$$

Persamaan (18) bukanlah persamaan konstitutif melainkan hanya persamaan matematis untuk idealisasi (*smoothing*) data tegangan dan regangan.

Gambar 2 memperlihatkan bahwa perilaku dasar (*constitutive behavior*)

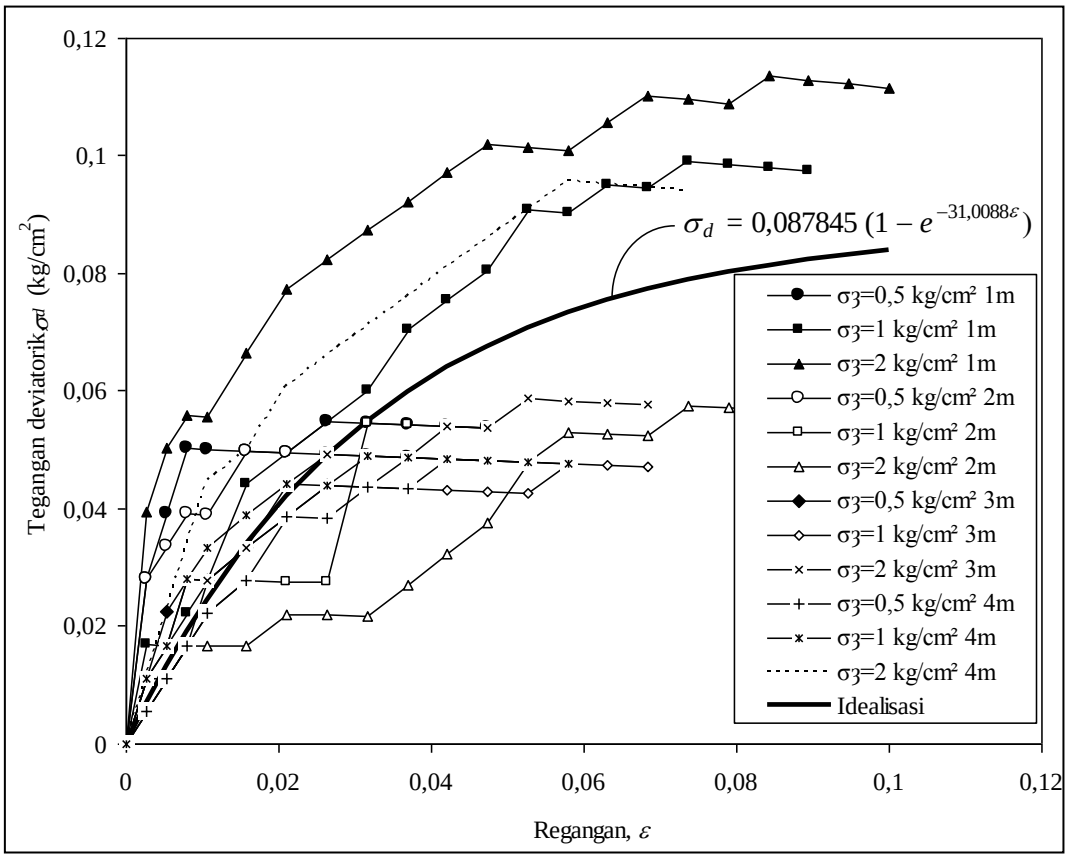
Tabel 1 Sifat-sifat mekanik sampel tanah gambut

Kedalaman	c	ϕ	γ
m	kg/cm^2	derajat	gr/cm^3
1	0,022	0,9417	0,931
2	0,023	0,1525	0,913
3	0,021	0,2216	0,907
4	0,012	0,9793	0,977

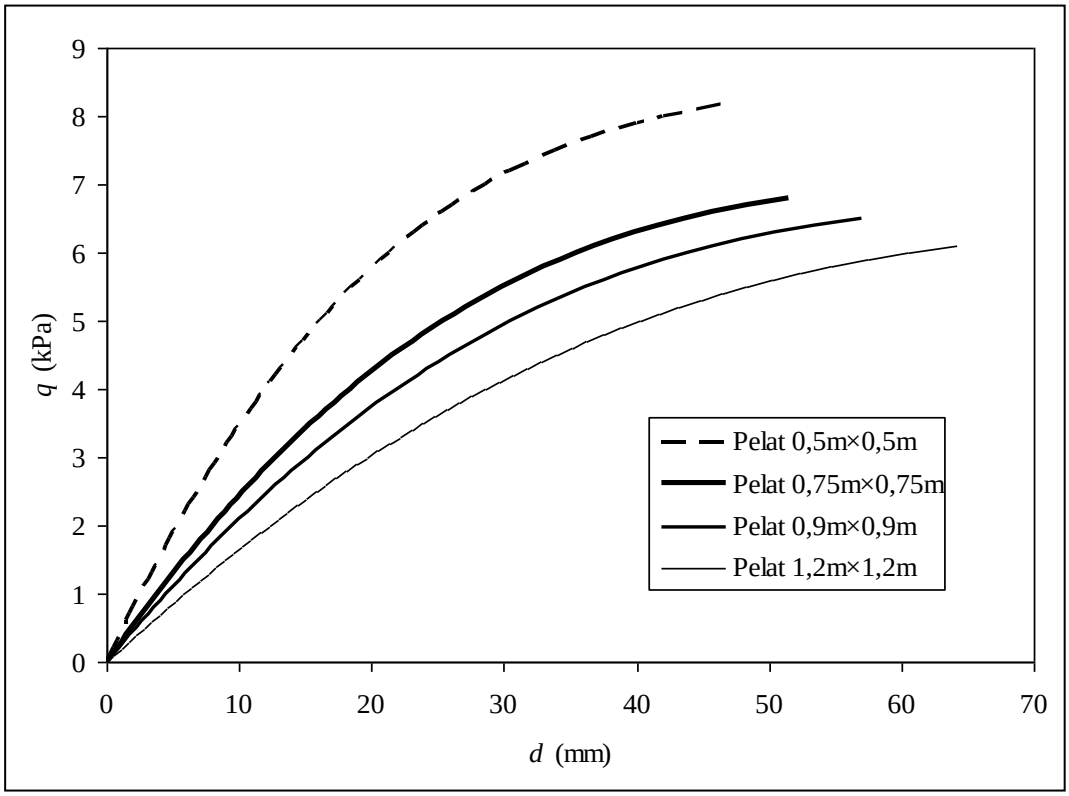
sampel tanah adalah nonlinier yang sudah terjadi mulai dari nilai regangan yang rendah. Dengan perilaku konstitutif seperti itu, sangat sulit untuk mendapatkan salah satu parameter dalam perencanaan jalan beton yaitu *k*.

3.2 Kurva Hubungan *q* dan *d*

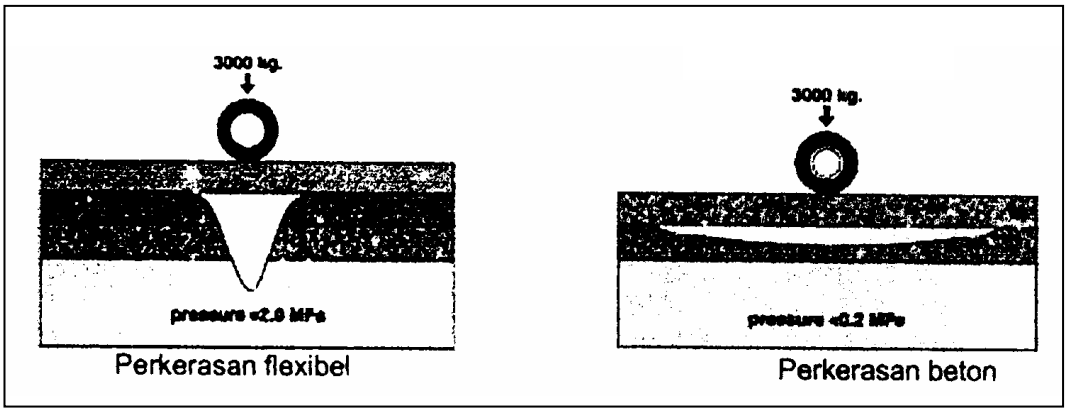
Ukuran pelat yang ditinjau terdiri dari empat variasi yaitu pelat berukuran 0,5m×0,5m, 0,75m×0,75m, 0,9m×0,9m, dan 1,2m×1,2m. Hasil *running* program dapat dilihat pada Gambar 3. Gambar ini menjelaskan bahwa semakin luas permukaan pelat maka semakin kecil tekanan yang terjadi pada tanah dasar sebagaimana diharapkan. Karena itu, untuk perkerasan jalan di atas tanah yang mempunyai daya dukung rendah, maka penggunaan pelat kaku yang lebar sangat efektif untuk menyebarkan (meratakan) beban terpusat dari roda kendaraan sehingga tekanan yang terjadi pada tanah



Gambar 2 Data tegangan dan regangan tanah gambut.



Gambar 3 Grafik hubungan *q* dan *d*



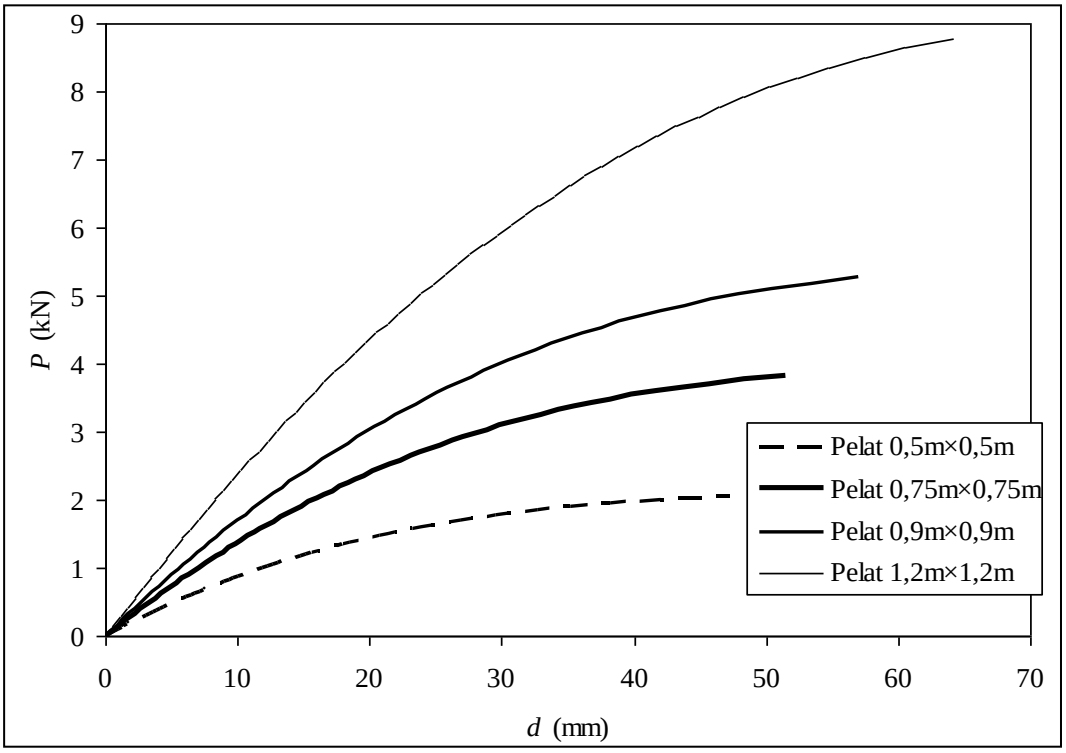
Gambar 4 Ilustrasi pengaruh beban roda terhadap lapisan perkerasan

menjadi kecil. Berbeda dengan jalan aspal (perkerasan lentur) di mana tekanan yang terjadi terkonsentrasi di bawah beban roda kendaraan seperti diilustrasikan pada Gambar 4 (Napitupulu, 2006).

3.3 Beban Ultimit

Berikutnya, dari kurva hubugan *q* dan *d* diperoleh grafik hubungan *P* dan *d* yang dihitung dengan Persamaan (12) sehingga diperoleh Gambar 5. Gambar ini telah memperlihatkan bahwa semakin luas permukaan pelat maka beban yang dapat dipikul pelat semakin besar sebagaimana diharapkan. Kemudian, dengan bantuan program yang telah dikembangkan dalam Hadi dan Yusuf (2007) diperoleh hubungan beban ultimit seperti pada Gambar 6. Dengan menggunakan program CuirveExpert v1.3 diperoleh model yang cukup sesuai dengan titik-titik data pada Gambar 6 yaitu model MMF (Morgan-Mercer-Flodin) sebagai berikut:

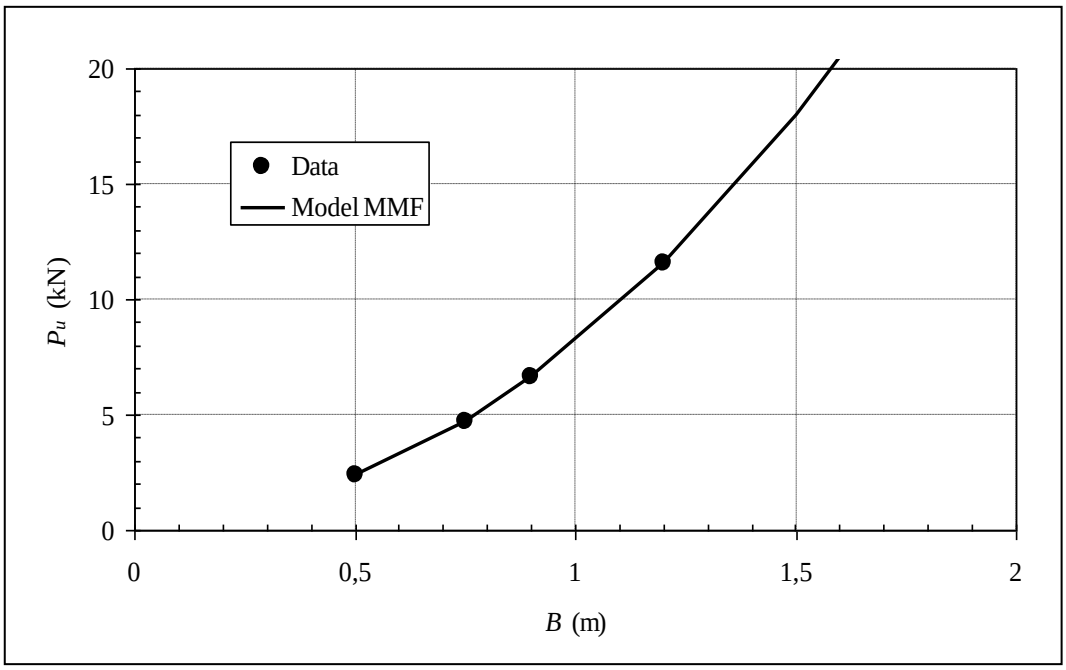
$$P_u = \frac{0{,}742275 \times 32{,}14439 + 245{,}2292 B^{2{,}19891}}{32{,}14439 + B^{2{,}19891}} \tag{19}$$



Gambar 5 Grafik hubungan *P* dan *d*

Model MMF bukanlah satu-satunya model yang paling sesuai untuk memodelkan hubungan P_u dan B tersebut; model-model lain masih banyak yang dapat digunakan. Yang perlu diperhatikan bahwa untuk memilih model-model regresi tersebut tidak semata-mata berdasarkan nilai korelasi, melainkan juga berdasarkan kecenderungan kurva di luar rentang titik-titik data yang ada. Hal ini diperlukan khususnya untuk melakukan ekstrapolasi.

Gambar 6 perlu diverifikasi lebih lanjut karena gambar tersebut belum memperhitungkan tebal pelat. Walaupun penambahan luas bidang kontak antara pelat beton dengan permukaan tanah akan meningkatkan nilai P_u, akan tetapi semakin luas bidang kontak tersebut akan semakin besar pula kemungkinan terjadinya keruntuhan pada pelat beton. Berdasarkan hasil studi numerik dalam Yusuf (2002), untuk pelat beton berukuran 1,2m×1,2m dengan mutu 20 MPa selama belum terjadi keruntuhan pada tanah pendukung, setiap peningkatan tebal pelat sebesar 5% dari lebarnya maka terjadi peningkatan kekuatan pelat sebesar 400 kN.

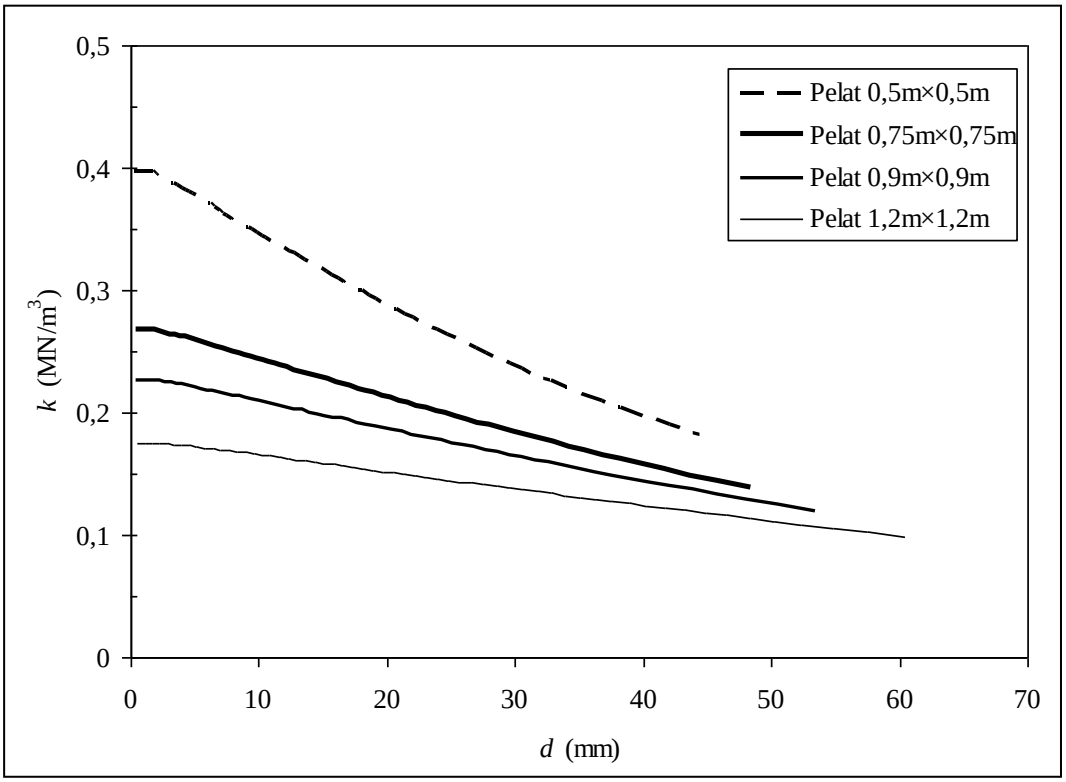


Gambar 6 Grafik hubungan P_u dan B

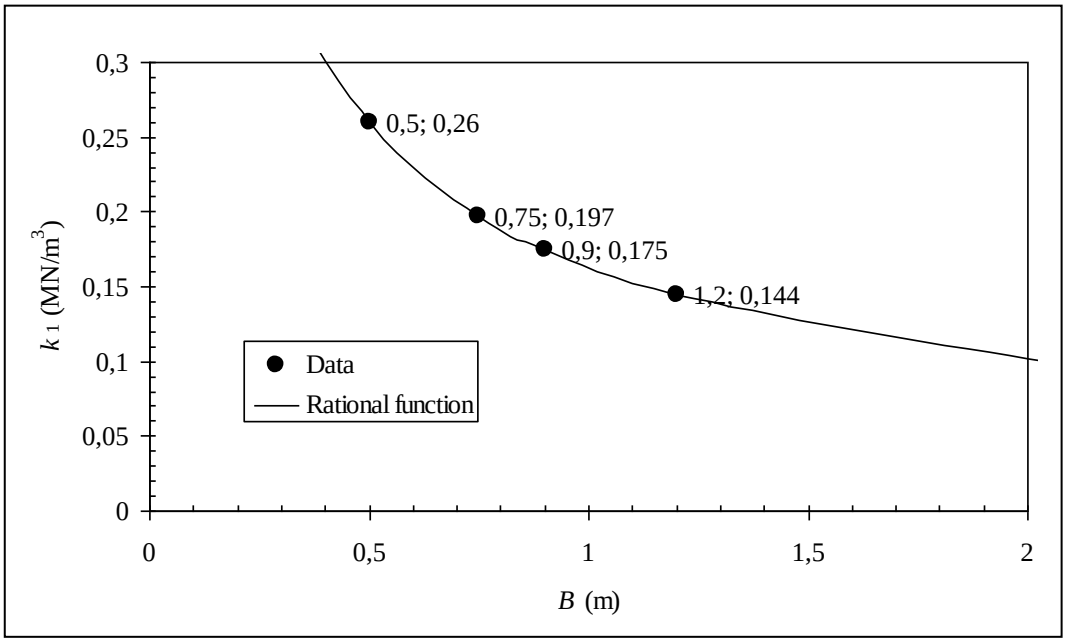
Pada tanah yang mempunyai daya dukung rendah, penambahan tebal pelat tidak memberikan keuntungan yang berarti, melainkan akan menurunkan daya dukung tanah, karena penambahan tebal pelat akan sekaligus pula menambah berat sendiri pelat tersebut. Karena itu, solusi untuk meningkatkan daya dukung pelat beton di atas tanah gambut yang berdaya dukung rendah ini, harus berfokus pada peningkatan kekakuan pelat beton, tanpa menambah berat sendiri pelat. Karena itu pula, penggunaan baja tulangan merupakan pilihan yang lebih baik daripada menambah tebal pelat beton.

3.4 Modulus Reaksi Tanah Dasar

Dengan didapatkan grafik hubungan *q* dan *d* maka nilai *k* berdasarkan Persamaan (13) dapat digambarkan dengan mudah seperti terlihat pada Gambar 7. Gambar ini memperlihatkan bahwa semakin besar/luas penampang mendatar pelat maka nilai *k* semakin



Gambar 7 Modulus reaksi tanah dasar



Gambar 8 Grafik hubungan k_1 dan B

kecil. Nilai k_1 untuk masing-masing ukuran pelat juga dapat dibaca langsung dari Gambar 7 ataupun dengan interpolasi linier dari *output* program yang berupa data diskrit. Hasil interpolasi ini dapat dilihat pada Gambar 8. Dengan program CurveExpert v1.3 diperoleh persamaan yang *fit* terhadap data hubungan k_1 dan B yaitu model *rational function* sebagai berikut

$$k_1 = \frac{117091{,}98 + 224093{,}65B}{1 + 1427102{,}2B + 668639{,}47B^2} \tag{20}$$

Sebagaimana Persamaan (19) maka Persamaan (20) juga bukan satu-satunya model persamaan yang sesuai dengan titik-titik data pada Gambar 8, melainkan masih terdapat model-model persamaan yang lain. Yang perlu diperhatikan adalah model persamaan dapat dipergunakan untuk ekstapolasi.

4. PENUTUP

Sampel tanah yang diuji dalam studi ini adalah tanah gambut yang mempunyai daya dukung sangat rendah. Untuk memperkecil tekanan pada tanah maka penggunaan pelat kaku merupakan pilihan terbaik di mana semakin luas semakin kecil tekanan pada tanah.

Program komputer yang dikembangkan dalam studi ini dapat menggambarkan

grafik hubungan tekanan versus deformasi tanah. Berdasarkan grafik tersebut telah dikembangkan juga program komputer untuk mendapatkan beban ultimit khusus cara Van der Veen. Dengan metode ini, hubungan matematis beban ultimit (P_u) dengan panjang sisi pelat bujur sangkar (B) dapat didekati dengan model MMF sebagai

$$P_u = \frac{0{,}742275 \times 32{,}14439 + 245{,}2292 B^{2{,}19891}}{32{,}14439 + B^{2{,}19891}}$$

Dengan menggunakan metode sekan telah didapat pula hubungan modulus reaksi tanah dasar (k) terhadap deformasi tanah. Dari hubungan ini dapat diperoleh nilai k_1 yaitu k pada penurunan 1 inci dengan model

$$k_1 = \frac{117091{,}98 + 224093{,}65B}{1 + 1427102{,}2B + 668639{,}47B^2}$$

Dengan pendekatan ini, untuk pelat berukuran 1,2m×1,2m maka modulus reaksi tanah dasar diperoleh sebesar 0,144 MN/m^3.

Daftar Pustaka

Alamsyah, Alik Ansyori. 2003. *Rekayasa Jalan Raya*. Malang: UMM Press.

Bowles, Joseph E. 1996. *Foundation Analysis and Design*. 5th Ed. Singapore: McGraw-Hill.

Das, Braja M. 1999. *Principles of Foundation Engineering*. 4th ed. Pacific Grove: Brooks/Cole Publishing Company.

Falkner, H.; Huang, Z.; dan Teutsch, M. 1995. "Comparative Study of Plain and Steel Fiber Reinforced Concrete Grund Slabs." *Concrete International: Slabs and Foundation*. Vol.17(1).

Hadi, Abdul dan Yusuf, M. 2007. "Interpretasi Beban Ultimit Cara Van Der Veen dengan Pengembangan Program Komputer". *Jurnal Teknik Sipil*. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. Vol 7(2), hlm. 183-198.

Hendarsin, Shirley L. 2000. *Penuntun Praktis Perencanaan Teknik Jalan Raya*. Bandung: Politeknik Negeri Bandung.

Napitupulu, Harrys. 2006. "Kemajuan Perkerasan Beton di Indonesia". *Short Course HAKI: Perencanaan Rigid Pavement*. 21 Juli 2006. Pontianak.

Sapar, Herman. 2006. "Perencanaan Tebal Pelat Beton Perkerasan Jalan". *Short Course HAKI: Perencanaan Rigid Pavement*. 21 Juli 2006. Pontianak.

Suryawan, Ari. 2005. *Perkerasan Jalan Beton Semen Portland (Rigid Pavement)*. Yogyakarta: Beta Offset.

Vivi B. dan Yusuf, M. 2008. "Pengaruh Variasi Jumlah Cerucuk pada Fondasi Pelat Beton Bercerucuk". *Jurnal Teknik Sipil*. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. Vol.8(1), hlm.29-40.

Yusuf, M dan Vivi B. 2005. "Verifikasi Eksperimental Perhitungan Modulus Subgrade di atas Tanah Pasir dengan Teori Pertambahan Tegangan Boussinesq". *Jurnal Teknik Sipil*. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. Vol. 5(2), hlm. 181-194.

Yusuf, M dan Vivi B. 2006. "Uji Pembebanan Pelat Skala Kecil di Lapangan pada Tanah Lunak". *Jurnal Teknik Sipil*. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. Vol. 6(1), hlm. 83-96.

Yusuf, M. 2002. "Analisis Nonlinier Pelat Beton di atas Fondasi Elastis Nonlinier dengan Metode Elemen Hingga". *Jurnal Teknik Sipil*. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. Vol.2(1).hlm.37-54.

Yusuf, M. 2006. "Subgrade dan Subbase pada Perkerasan Kaku". *Short Course HAKI: Perencanaan Rigid Pavement*. 21 Juli 2006. Pontianak.

Yusuf, M. 2008a. "Tinjauan Pola Retak pada Pelat Beton Bercerucuk". *Jurnal Teknik Sipil*. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. Vol.8(1), hlm.51-66.

Yusuf, M. 2008b. "Kajian Numerik dan Eksperimental Perilaku Pelat Beton di Atas Tanah". *Jurnal Teknik Sipil*. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura. Vol. 8(2), hlm. 123-140.