

ANALISIS DAN PERENCANAAN PONDASI LAJUR BERDASARKAN KEANDALAN

John Tri Hatmoko ¹⁾

¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jln. Babarsari No. 44 Yogyakarta
E-mail: john@uajy.ac.id

ABSTRAK

Pada analisis dan perencanaan struktur-struktur geoteknik, hampir semua variabel perencanaan memiliki beberapa derajat ketidakpastian; dengan demikian variabel-variabel tersebut dianggap sebagai variabel random. Para ahli geoteknik pada dasarnya mengakui bahwa parameter-parameter perencanaan penuh dengan ketidakpastian. Namun demikian, model-model perencanaan tradisional yang bersifat deterministik menyederhanakan persoalan-persoalan dengan menganggap parameter-parameter yang tidak pasti menjadi deterministik. Analisis dan perencanaan berdasarkan keandalan lebih masuk akal karena analisis ini memperhatikan ketidakpastian setiap variabel yang diperhitungkan dalam analisis. Pada beberapa tahun terakhir, hal tersebut sangat mungkin dilakukan karena banyaknya analisis statistik berhubungan dengan sifat-sifat tanah. Penelitian ini bertujuan memodelkan analisis dan desain pondasi lajur berdasarkan keandalan dengan mempresentasikan dua buah fungsi unjuk kerja dari perilaku pondasi lajur yang dibangun di atas tanah dengan kohesi dan sudut gesek dalam ($c - \phi$ soil). Dua fungsi unjuk kerja tersebut adalah fungsi batas layanan dan fungsi batas ultimit. Disamping itu juga memodelkan ketidakpastian parameter-parameter geser tanah dan koefisien-koefisien gempa sebagai variabel probabilistik. Permasalahan pada penelitian ini dibatasi bahwa : model adalah pondasi lajur di atas tanah dengan kohesi dan sudut gesek dalam; moda unjuk kerja yang dipresentasikan adalah moda batas layanan dan moda batas ultimit; pada moda batas ultimit hanya dibahas mengenai keruntuhan karena punching; pembebanan yang ditinjau hanyalah pembebanan vertikal statik saja. Metode penelitian dibagi menjadi dua bagian besar. Pertama adalah pengujian lapangan untuk menentukan parameter-parameter geser tanah. Kedua adalah kajian analisis keandalan pondasi lajur yang dibangun di atas tanah $c-\phi$. Tinjauan daya dukung tanah dasar dikaji melalui kondisi statis, dengan pembebanan vertikal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa indeks keandalan menurun dengan meningkatnya beban kerja, dan meningkat dengan menurunnya beban kerja (Ps). Anggapan tidak adanya korelasi antara parameter-parameter kuat geser tanah (c , dan ϕ), lebih konservatif jika dibandingkan dengan adanya korelasi antara parameter-parameter tersebut. Lebar pondasi probabilistik menurun dengan meningkatnya korelasi antara parameter kuat geser tanah; dan menurunnya koefisien variasi pada variabel-variabel perencanaan. Pendekatan dengan anggapan bahwa variabel-variabel perencanaan terdistribusi normal lebih konservatif jika dibandingkan dengan asumsi terdistribusi log-normal.

Kata kunci: keandalan, probabilistik, pondasi lajur, fungsi keruntuhan, angka keamanan.

1. PENDAHULUAN

Analisis keandalan memberikan alternatif hitungan yang mengkombinasikan pengaruh-pengaruh ketidakpastian, dan membedakan tinggi rendahnya ketidakpastian didalam suatu sistem struktur. Sebenarnya metode keandalan adalah tepat digunakan dibidang geoteknik, akan tetapi metode ini belum banyak diterapkan dengan intensif. Mengapa metode keandalan dibidang geoteknik tidak/belum diterapkan ada dua alasan sebagai berikut. Pertama, teori-teori keandalan mengandung konsep-konsep yang tidak biasa diterapkan di bidang geoteknik. Kedua, penggunaan analisis keandalan dikawatirkan akan banyak memerlukan data, waktu, dan usaha yang lebih dibanding dengan jika digunakan metode yang sudah ada. Pada analisis dan perencanaan struktur-struktur geoteknik, hampir semua variabel perencanaan memiliki beberapa derajat ketidakpastian; dengan demikian variabel-variabel tersebut dianggap sebagai variabel random. Para ahli geoteknik pada dasarnya mengakui bahwa parameter-parameter perencanaan penuh dengan ketidakpastian. Namun demikian, model-model perencanaan tradisional yang bersifat deterministik menyederhanakan persoalan-persoalan dengan menganggap parameter-parameter yang tidak pasti menjadi deterministik dan dengan memperhitungkan ketidakpastian- ketidakpastian dengan menggunakan angka keamanan global yang pada dasarnya adalah *faktor pengabaian*. Angka keamanan tersebut diturunkan berdasarkan pada pengalaman dan tidak merefleksikan ketidakpastian setiap parameter perencanaan. Analisis dan perencanaan berdasarkan keandalan lebih masuk akal karena analisis ini memperhatikan ketidakpastian setiap variabel yang diperhitungkan dalam analisis. Pada beberapa tahun terakhir, hal tersebut sangat mungkin dilakukan karena

banyaknya analisis statistik berhubungan dengan sifat-sifat tanah. Akhir-akhir ini, analisis- analisis geoteknik berdasarkan keandalan sudah banyak dilakukan secara intensif pada analisis dan perencanaan stabilitas lereng (Christian, 1994; Tang, 1997; Hassan, 1999; El-Ramly, 2002); stabilitas penahan tanah (Duncan, 2000). Namun demikian, sangat sedikit penulis yang meneliti analisis dan perencanaan berdasarkan keandalan untuk pondasi dangkal, terutama pondasi lajur. Ada bebrapa penelitian (Grffith 2001; Fenton 2002,2003; Popescue, et.al. 2005). Mereka memodelkan parameter tunggal seperti : elastik modulus tanah, kohesi, sudut gesek dalam; tidak mempertimbangkan ketidakpastian variabel-variabel perencanaan secara komprehensif.

Penelitian ini bertujuan memodelkan analisis dan desain pondasi lajur berdasarkan keandalan dengan mempresentasikan dua buah fungsi unjuk kerja dari perilaku pondasi lajur yang dibangun diatas tanah dengan kohesi dan sudut gesek dalam (c – soil). Dua fungsi unjuk kerja tersebut adalah fungsi batas layanan dan fungsi batas ultimit. Disamping itu juga memodelkan ketidakpastian parameter-parameter geser tanah dan koefisien-koefisien gempa sebagai variabel probabilistik. Permasalahan pada penelitian ini dibatasi bahwa : model adalah pondasi lajur diatas tanah dengan kohesi dan sudut gesek dalam; moda unjuk kerja yang dipresentasikan adalah moda batas layanan dan moda batas ultimit; pada moda batas ultimit hanya dibahas mengenai keruntuhan karena punching; pembebanan yang ditinjau hanyalah pembebanan vertikal statik saja

2. KONSEP DASAR KEANDALAN

Keandalan

Indeks keandalan struktur geoteknik adalah ukuran keamanan yang memperhitungkan bahwa semua atau beberapa variabel perencanaan merupakan variabel random. Pada analisis dan perencanaan berdasarkan keandalan, variabel variabel perencanaan seperti beban (F) dan ketahanan (Q) sebagai variabel random. Untuk penyederhanaan, dianggap bahwa semua komponen beban dan ketahanan sebagai variabel yang memiliki distribusi sama. Beban (F) dan ketahanan (Q) pada umumnya positif, sehingga secara matematis kedua parameter pokok perencanaan tersebut dapat dianggap terdistribusi lognormal. Permasalahan pokok pada keandalan adalah mengevaluasi probabilitas kegagalan (p_f) atau indeks keandalan () dari karakteristis ketidakpastian beban dan ketahanan yang pada umumnya melibatkan harga rerata beban dan ketahanan (m_F dan m_Q), koefisien variasi (COV_F dan COV_Q). Untuk F dan Q terdistribusi lognormal, pf dapat dapat dihiung sbb:

$$p_f = \text{Prob}(Q < F) = \text{Prob}\left\{\frac{\ln Q}{\ln F} < 1\right\} = \text{Prob}\left\{\ln \frac{Q}{F} < 0\right\} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Prob}\{\ln Q - \ln F < 0\} = \text{Prob}\{Q^* - F^* < 0\} \dots\dots\dots(2)$$

Q* dan F* ekuivalensi distribusi normal dari Q dan F. Pada keadaan ini, batas keamanan M = Q* - F*, mean dan standar deviasi M dapat dituliskan sebagai berikut:

$$m_M = m_{Q^*} - m_{F^*} \dots\dots\dots(3)$$

$$s_M^2 = s_{Q^*}^2 + s_{F^*}^2 \dots\dots\dots(4)$$

m_M , m_{Q*} ,m_{F*} mean dari batas keamanan M, ketahanan terdistribusi normal, dan beban terdistribusi normal secara berurutan. Probabilitas kegagalan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$p_f = \text{Prob}\{(Q^* - F^*) < 0\} \dots\dots = \frac{\Phi\left(-\frac{m_M}{s_M}\right)}{\Phi} \dots\dots\dots(5)$$

Mean dari distribusi lognormal (m) dan standar deviasinya (s) dapat dihubungkan dengan mean dan standar deviasi distribusi normal (m_N) dan (s_N) dengan persamaan berikut:

$$m_N = \ln \frac{m}{\sqrt{1 + \text{COV}^2}} \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{COV} = \frac{s}{m} \dots\dots\dots(7)$$

$$s_N = \sqrt{\ln(1 + \text{COV}^2)} \dots\dots\dots(8)$$

Dengan menggabung persamaan (1) sampai dengan (8), menghasilkan indeks keandalan sebagai berikut:

$$= \frac{m_M}{s_M} = \frac{\ln \frac{\frac{1}{s_Q} m_Q}{s_Q}}{\ln \left(\frac{1 + COV^2_Q}{1 + COV^2_F} \right)} \dots\dots(9)$$

Persamaan (9) diatas sudah digunakan sebagai dasar analisis dan perencanaan berdasarkan keandalan (Becker, 1996; Phoon et al., 2003), dan dapat digunakan untuk mengevaluasi indeks keandalan () untuk ultimate limit state (ULS) ataupun Serviceability limit state (SLS). Untuk referensi, tabel 1 berikut menghubungkan indeks keandalan, probabilitas kegagalan dan tingkat unjuk kerja dari komponen-komponen struktur geoteknik. Indeks keandalan diambil intereval dari 1 sampai dengan 5 yang menghasilkan probabilitas kegagalan dari 0,16 sampai dengan 3×10^{-7} .

Tabel 1. Hubungan antara indeks keandalan, probabilitas kegagalan dan tingkat unjuk kerja.

Indeks Keandalan	Prob. Kegagalan Pf= (-)	Tingkat unjuk kerja yg diharapkan
1,0	0,16	berbahaya
1,5	0,07	Tidak memuaskan
2,0	0,023	jelek
2,5	0,006	Dibawah rerata
3,0	0,001	Diatas rerata
4,0	3E-5	baik
5,0	3E-7	Sangat baik

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian didalam penelitian ini dibagi menjadi dua bagian besar. Pertama adalah pengujian lapangan/ laboratorium untuk menentukan parameter-parameter geser tanah. Kedua adalah kajian analisis keandalan pondasi lajur yang dibangun diatas tanah c-φ . Tinjauan daya dukung tanah dasar dikaji dengan satu model beban vertikal statis.

Pengujian laboratorium

Pengujian sifat-sifat fisika tanah meliputi : pengujian kadar air, pengujian berat jenis, pengujian batas-batas konsistensi, pengujian analisis saringan (untuk menentukan gradasi tanah).

Pengujian sifat-sifat mekanika tanah meliputi : pengujian geser langsung dan pengujian tekan bebas untuk menentukan parameter-parameter geser tanah (c dan φ)

Pemodelan keruntuhan

Keruntuhan pondasi dimodelkan menjadi dua model. Model, M, adalah mekanisme keruntuhan translasional dari banyak blok yang simetri yang digunakan untuk analisis daya dukung tanah dasar akibat beban vertikal statis. Pemodelan ini didasarkan pada teori batas atas pada analisis batas. Teori batas tersebut diterapkan pada persoalan pondasi lajur dengan lebar tertentu dengan menggunakan mekanisme keruntuhan yang dapat diterima.

Analisis keandalan pondasi lajur

Karena besarnya ketidakpastian pada parameter-parameter geser tanah (c dan φ), maka parameter parameter tersebut dianggap sebagai variabel random. Pada penelitian ini yang paling utama adalah mempresentasikan analisis keandalan untuk pondasi lajur yang dibangun diatas tanah yang memiliki kohesi dan sudut gesek dalam, dengan batasan bahwa beban yang bekerja pada pondasi tersebut adalah beban vertikal statik saja. Fungsi unjuk kerja yang digunakan pada analisis keandalan didefinisikan terhadap keruntuhan geser pada tanah dasar yang dapat dituliskan sebagai:

$$G = P_u - P_s$$

Dimana P_u : beban ultimit, sedangkan P_s : beban kerja/ beban yang bekerja pada pondasi tersebut.

Persamaan daya dukung tanah

Analisis daya dukung tanah ditunjukkan dengan menggunakan persamaan- persamaan sebagai berikut:

$$P_u = \frac{1}{2} \cdot B^2 \cdot N_c + q \cdot B \cdot N_q + c \cdot B \cdot N_c$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berat volume

Hasil pengujian sifat fisik yang penting adalah berat volume tanah. Hasil pengujian berat volume tanah untuk 7 (tujuh) buah sampel diperoleh harga rerata = 17,757 kN/m² dan standar deviasi = 0,346, dengan COV = 0,02. Varians berat volume ini sangat rendah disebabkan metoda pengujian untuk besaran ini sangat sederhana dan tidak menggunakan alat-alat pengujian yang bervariasi.

Parameter kuat geser (c , ϕ)

Perolehan parameter kuat geser tanah (c , ϕ) dilakukan dengan prosedur pengujian menurut SNI 03-3420-1994 : metode pengujian kuat geser langsung tanah tidak terkonsolidasi tanpa drainase; atau menggunakan standar asing : AASHTO T 236-72, dan ASTM, 1982 D 3080-72. Hasil pengujian dari 9 buah sample sebagai berikut:

harga rerata kohesi = 19,67 kPa, dengan standar deviasi = 2,76 kPa; sehingga COV = 0,15, harga rerata kohesi = 31,33 derajat, dengan standar deviasi = 3,21 derajat; sehingga COV = 0,10. Harga koefisien variasi untuk parameter kuat geser tanah cukup besar disebabkan oleh jenis alat dan perlengkapannya yang cukup kompleks, juga disebabkan oleh metode pengujianya. Untuk sembilan buah sample tersebut dibagi menjadi 3 kategori tegangan/gaya normal. Sampel 1 sampai 3 menggunakan gaya normal 4 kg ditambah berat batu pori + silinder seberat 4,843 kgram sehingga beban total = 8,843 kgram. Untuk sample 4 sampai 6 menggunakan beban normal 8 kgram sehingga beban total = 12,843 kgram. Sampel 7 sampai 9 menggunakan beban normal sebesar 12 kgram sehingga beban vertical total = 16,843 kgram. Luas bidang tekan/geser sebesar 31,021 cm²; maka tegangan normal berturut-turut : 0,285 kg/cm² (28,5 kPa); 0,414 kg/cm² (41,4 kPa) dan 0,543 kg/cm² (54,3 kPa)

Menurut beberapa literature, kedua parameter (c dan ϕ) pada umumnya memiliki korelasi. Menurut Harr (1987) bahwa kedua parameter tersebut memiliki korelasi negative, walaupun dia tidak menyebutkan berapa besar koefisien korelasi tersebut. Wolf (1985) menghasilkan bahwa koefisien korelasi antara c dan ϕ adalah -0,47.; Yuceman (1973) menghasilkan angka antara -0,49 sampai dengan -0,24. Lumb (1970) : $-0,70 < c < -0,37$; Cherubini (2000) : $c = -0,61$. Pada penelitian ini diambil untuk $\mu_c = 19,67$ kPa, COV = 0,20 ; $\mu_\phi = 31,33$ derajat, COV = 0,10 dengan koefisien korelasi $r_{c\phi} = -0,50$. Harga ini masih dalam rentang angka-angka yang ada didalam literature yang disebut diatas.

Mekanisme keruntuhan

Dengan konfigurasi yang dimodelkan, beban ultimit yang bekerja pada pondasi dengan tanah yang memiliki parameter geser tersebut diatas $P_u = 2558,2$ kN/m Pada penelitian ini, distribusi probabilitas untuk variabel random ditinjau 2 kasus. Kasus pertama, parameter-parameter tanah c dan ϕ diasumsikan sebagai variabel random terdistribusi normal; kasus kedua, c dan ϕ dianggap sebagai variabel random terdistribusi lognormal. Untuk kedua kasus tersebut dilihat apakah ada korelasi ataukah tidak.

Bidang keruntuhan

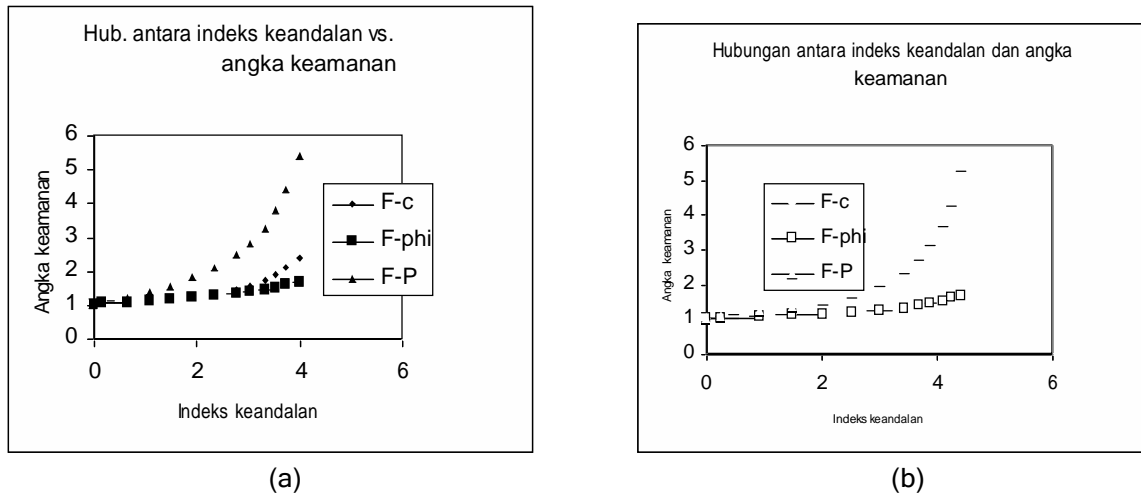
Metoda konvensional deterministik digunakan untuk menghitung angka keamanan dan beban ultimit yang bekerja pada massa tanah didasarkan pada minimisasi fungsi-fungsi distribusi. Permukaan angka keamanan minimum atau pada beban ultimit disebut sebagai permukaan kritis deterministik. Pendekatan yang lazim digunakan untuk menentukan keandalan pada tanah yang menerima tegangan didasarkan pada hitungan indeks keandalan (λ).

Bidang runtuh yang diperoleh dengan asumsi indeks keandalan minimum disebut sebagai permukaan kritis probabilistik. Indeks keandalan yang diperoleh dari hitungan permukaan kritis probabilistik lebih kecil, atau lebih kritis, dibanding dengan hitungan yang didasarkan pada permukaan kritis deterministik. Selisih perbedaan relatif yang terjadi antara kedua pendekatan tersebut sekitar 10%.

Indeks keandalan dan angka keamanan

Pembebanan dimulai dengan harga kecil (sekitar 47,5 kN/m) sampai dengan beban ultimit deterministik ($P_{uk} = 2558,2$ kN/m). Untuk semua kasus, indeks keandalan menurun dengan bertambahnya beban kerja (P_s), atau dengan menurunnya angka keamanan. Dengan lain kata, indeks keandalan berbanding lurus dengan angka keamanan dan berbanding terbalik dengan beban kerja. Indeks keandalan tersebut akan menjadi 0,00 jika beban kerja sama dengan beban ultimit, dan pada kondisi ini angka keamanan sama dengan 1,00. (probabilitas kegagalan 50%). Dari gambar 1a dan 1b dapat dibandingkan hasil antara variabel random normal dan log-normal, terkorelasi atau tidak, bahwa indeks keandalan untuk variabel (parameter kuat geser tanah c dan ϕ) tanpa korelasi akan lebih rendah dibandingkan dengan variabel terkorelasi secara negatif. Sementara dapat disimpulkan bahwa dengan menganggap parameter kuat geser tanah tidak ada korelasi akan menghasilkan indeks keandalan yang lebih konservatif.

Sebagai contoh: untuk $P_s = 472,5 \text{ kN/m}$, indeks keandalan 4,00 (tanpa korelasi) dan 4,42 (dengan korelasi negatif) ; sehingga ada kenaikan indeks keandalan relatif sebesar kurang lebih 10%. Terlihat juga didalam gambar bahwa untuk harga angka keamanan kecil, indeks keandalan hampir sama; perbedaan harga indeks keandalan terlihat pada angka keamanan besar.



Gambar 1. Hubungan antara angka keamanan vs. Indeks keandalan : tanpa korelasi, (b). Ada korelasi negatif -0,50

Pada harga $P = 676,5 \text{ kN/m}$, kemungkinan titik keruntuhan untuk variabel terdistribusi normal terkorelasi dan tak terkorelasi diperoleh bahwa harga $c = 10,46 \text{ kPa}$, $\phi = 22$ derajat. Dengan harga rerata $c = 19,67 \text{ kPa}$ dan $\phi = 31,33$ derajat sebagai titik pusat ellipsis indeks keandalan. Bidang permukaan keruntuhan membagi kombinasi antara c , dalam kondisi runtuh dan dalam kondisi aman. Harga c , yang menggambarkan bidang batas keruntuhan diperoleh dengan mencari harga c , atau ϕ atau sebaliknya yang mencapai dua kondisi sebagai berikut : gaya ultimit (P_u)

minimum, dan angka keamanan : $F = \frac{P_u}{P_s} = 1$. Harga c dan ϕ dari titik perencanaan dengan harga beban vertikal yang berbeda akan memberikan angka keamanan parsial untuk setiap parameter geser sebagai berikut :

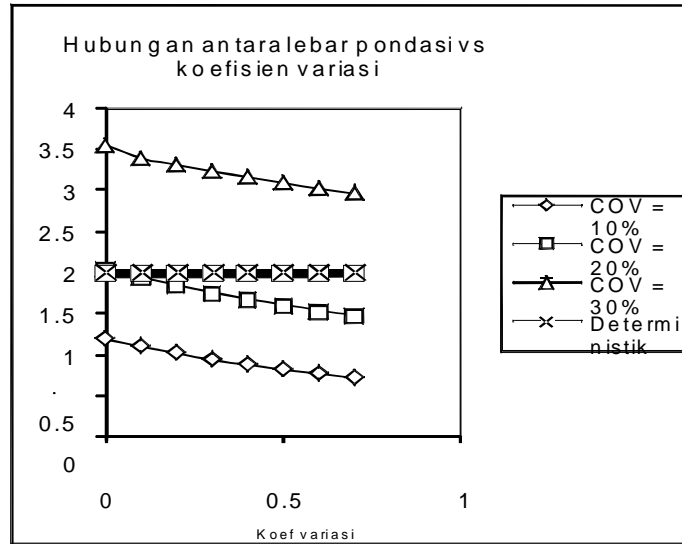
$F_c = \frac{\mu_c}{c}; F_\phi = \frac{\tan \mu_\phi}{\tan \phi}$. Pada titik perencanaan, harga parameter kuat geser tanah relatif sama untuk variabel dengan ataupun tanpa korelasi. Dengan meningkatnya harga parameter kuat geser tanah, beban kerja yang dapat didukung oleh pondasi juga mengalami peningkatan.

Perencanaan berdasarkan keandalan

Metode konvensional (deterministik) pada perencanaan pondasi dangkal pada umumnya berdasarkan pada target angka keamanan ($SF = 3$) untuk menentukan dimensi pondasi. Akhir-akhir ini, perencanaan berdasarkan keandalan sudah banyak diterapkan oleh beberapa peneliti, dan juga didalam penelitian ini. Pada *reliability based design* (RBD), dalam menentukan dimensi pondasi menggunakan target indeks keandalan (β_{target}) yang menurut Euro code diambil $= 3,8$. Dimensi pondasi hasil perencanaan ini disebut *dimensi pondasi probabilistik*. Metode keandalan yang dipakai adalah first order reliability method (FORM). Probabilitas kegagalan dapat didekati dengan : $P_f = (-)$, dimana : indeks keandalan , dan (..) : fungsi distribusi kumulatif /commulative distribution function (CDF) untuk fungsi distribusi normal standard. Untuk variable terdistribusi normal :

$$= \frac{(P_u - P_s)}{\sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_s^2 + 2 \sigma_u \sigma_s \rho}}, \text{ sedangkan untuk variable terdistribusi log-normal : } = \frac{\ln \frac{P_u}{P_s}}{\sqrt{\ln u^2 + \ln s^2 + 2 \ln u \cdot \ln s}}$$

Untuk menghitung lebar pondasi probabilistic (B), dan angka keamanan total (F_p) digunakan persamaan-persamaan tersebut dengan indeks keandalan target 3,8. Tegangan tanah ($\sigma_s = 426,4 \text{ kN/m}^2$) sama dengan tegangan ultimit dibagi dengan angka keamanan deterministic ($SF=3$).



Gambar 2. Hubungan antara lebar pondasi (B) vs koefisien variasi dan koefisien korelasi

Gambar 2, menunjukkan hubungan antara lebar pondasi (B), koefisien korelasi dan koefisien variasi, dengan asumsi variabel terdistribusi normal. Lebar pondasi menurun dengan meningkatnya koefisien korelasi, dan meningkat dengan menurunnya koefisien variasi. Untuk harga koefisien variasi rendah, 20% atau 10%, lebar pondasi probabilistik lebih rendah dibanding lebar pondasi deterministik. Untuk harga koefisien variasi tinggi dan koefisien korelasi rendah, lebar pondasi dengan asumsi distribusi normal lebih besar jika dibandingkan dengan asumsi distribusi log-normal. Oleh sebab itu, asumsi distribusi normal lebih konservatif dibanding dengan asumsi log-normal. Lebar pondasi probabilistik dapat lebih besar dan mungkin lebih kecil dibanding lebar pondasi deterministik, tergantung pada ketidakpastian variabel-variabel perencanaan. Dengan demikian, perencanaan berdasarkan keandalan memiliki keuntungan dalam hal merefleksikan ketidakpastian, standar penyimpangan, distribusi probabilitas, serta korelasi antara variabel-variabel perencanaan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

- Parameter-parameter perencanaan merupakan variabel probabilistik, bukan variabel deterministik.
- Indeks keandalan menurun dengan meningkatnya beban kerja, dan meningkat dengan menurunnya beban kerja (P_s).
- Anggapan tidak adanya korelasi antara parameter-parameter kuat geser tanah (c , dan ϕ), lebih konservatif jika dibandingkan dengan adanya korelasi antara parameter-parameter tersebut.
- Lebar pondasi probabilistik menurun dengan meningkatnya korelasi antara parameter kuat geser tanah; dan meningkat dengan menurunnya koefisien variasi pada variabel-variabel perencanaan.
- Anggapan bahwa variabel-variabel perencanaan terdistribusi normal lebih konservatif jika dibandingkan anggapan terdistribusi log-normal.

Saran

- Pembebanan tidak hanya beban vertikal sentris saja, bisa beban vertikal eksentris, beban dengan inklinasi tertentu, atau bahkan beban dinamis.
- Keruntuhan yang ditinjau disarankan lebih bervariasi, tidak hanya keruntuhan karena punching saja.

DAFTAR PUSTAKA

- Becker, D.E.(1996):"Limit state design for foundation" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 33(6), 984-1007
- Christian, J.T., Ladd, C.C (1994). " Reliability Applied to slope stability analysis" *Journal of Geotechnical Engineering*; 20; Dec; pp.2180 – 2207.
- Tang., W. H; (1999) : "Reliability in back analysis of slope failure" *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, October

- Duncan JM, 2000: "Factors Safety and Reliability in Geotechnical Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 4, April 2000, pp.307-316.
- Fenton G.A., and Griffiths ,D.V; :” Probabilistic foundation settlement on spatially random soil “*Journal of Geotechnical and environmental Engineering*, 128(5), 381-390
- Foye,K.C; et.al, 2006: “Assessment of Variables Uncertentais for Reliability-Based Design of Foundations”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 9, September 2006, pp.1197-1207
- Griffiths, D.V., and Fenton, G.A (2002):” Bearing Capacity of Rough Rigid Strip footing on cohesive soil : Probabilistic Study” *Journal of Geotechnical and environmental Engineering*, 128(9), 743-755
- Hadar,S. et.al, 2008 : “Load Resistance Factor Design of Axially Loaded Pile Based on Load Test Results”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 8, August 2008, pp.1106-1117
- Hatmoko, J.T, & Ali, J (1999): “Reliability Assessment Model Perencanaan Perkerasan Lentur” *Jurnal Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta*, vol.7, No.3, Juni 2007
- Hatmoko, J.T, & Ali, J (2001): “Evaluasi Keandalan Daya Dukung Pondasi Dangkal Pada Tanah Pasir” *Jurnal Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta*, vol.2, No.1, Juni 2001
- Hatmoko, J.T; Susanto, B, & Supriyadi, D.S. (1999): “ Model Keandalan Sistem Kelompok Tiang”. *Laporan studi, LPPM Universitas Atma Jaya Yogyakarta*
- Bolton, M.D., (1986) :” The strength and dilatancy of sands” *Geotechnique*, 36,65-78.
- Ellingwood, B., (1999):”Wind load statistics for probability-based structural design” *Journal of Structural Engineering*, vol.125, No. 4.