

## KETIDAKPASTIAN FAKTOR-FAKTOR DAYA DUKUNG PONDASI DANGKAL PADA TANAH PASIR

John Tri Hatmoko<sup>1)</sup>, Yohanes Lulie<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Program studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta Jl. Babarsari No.44  
Yogyakarta : Email : john@mail.uajy.ac.id

<sup>2)</sup>Program studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta Jl. Babarsari No.44  
Yogyakarta : Email : lulie@mail.uajy.ac.id

### ABSTRAK

Ketidakpastian variabel-variabel perencanaan merupakan input penting pada analisis keandalan ataupun perencanaan berdasarkan keandalan. Sebagian besar variabel-variabel perencanaan memiliki ketidakpastian yang ditunjukkan oleh adanya standard deviasi pada variabel-variabel tersebut. *Probability density function (PDF)* digunakan untuk mendeskripsikan secara lengkap ketidakpastian tersebut pada analisis keandalan. Beberapa PDF yang sering digunakan antara lain : distribusi-distribusi normal, lognormal, uniform, dan distribusi beta. Dengan demikian, analisis keandalan memerlukan pemilihan PDF yang tepat. Tujuan penelitian ini adalah mencari pendekatan yang sistematis pada *Probability density function (PDF)* untuk masing-masing variabel perencanaan; dan mengidentifikasi distribusi untuk masing-masing variabel. Untuk menjelaskan variabel-variabel ketidakpastian didalam perencanaan berdasarkan keandalan/*reliability based design (RBD)* digunakan fungsi-fungsi distribusi probabilitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa : sumber-sumber ketidakpastian ditimbulkan oleh parameter-parameter beban dan parameter-parameter ketahanan; histogram beban hidup pada umumnya mendekati distribusi lognormal dengan faktor bias relatif tinggi ( 1,15), sedangkan ketidakpastian beban mati mendekati distribusi normal dengan faktor bias sangat rendah – mendekati 1; dimensi pondasi (lebar dan panjang) memiliki faktor bias sangat rendah (1,05) dengan histogram mendekati distribusi normal; dan faktor daya dukung  $N_{\gamma}, S_{\gamma}, d_{\gamma}$  untuk semua jenis pondasi mendekati distribusi log-normal. Namun demikian, faktor bias berbeda beda untuk setiap jenis pondasi yang ditinjau. Pondasi lajur 1,50 ; pondasi persegi dan pondasi persegi panjang memiliki faktor bias sama 1,40.

Kata-kata kunci : ketidakpastian, probability density function, beban, ketahanan, daya dukung, pondasi dangkal.

### 1. PENDAHULUAN

Angka-angka keamanan dalam praktek-praktek geoteknik konvensional pada umumnya didasarkan pada pengalaman yang logis. Namun demikian, pada umumnya, angka keamanan yang diambil merupakan harga tunggal, sebagai contoh angka keamanan pada stabilitas lereng, dinding penahan tanah dan sebagainya, yang sering kali tidak memperhatikan derajat ketidakpastian pada saat melakukan analisis. Melalui peraturan-peraturan atau kebiasaan, nilai tunggal angka keamanan sering diterapkan pada suatu kondisi yang sebenarnya harus mempertimbangkan adanya ketidakpastian. Dengan demikian, hal tersebut dianggap sesuatu yang tidak logis.

Hitungan-hitungan keandalan memberikan alternatif analisis 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. Dengan demikian, perlu di kembangkan penelitian-penelitian yang berhubungan dengan keandalan di dalam geoteknik. Yang kemudian, diikuti dengan penerapannya di dalam perencanaan struktur, baik struktur bangunan gedung bertingkat maupun struktur yang berhubungan dengan geoteknik seperti : perencanaan pondasi, lereng, dinding penahan tanah dan lain lain. Pada semua perencanaan belum memperhatikan ketidakpastian faktor faktor perencanaan tersebut. Padahal ketidakpastian variabel-variabel perencanaan ini merupakan input penting pada perencanaan berdasarkan pada keandalan. Tujuan penelitian ini adalah mencari pendekatan yang sistematis pada Probability density function (PDF) dan mencari pendekatan fungsi distribusi untuk masing-masing variabel perencanaan.

## 2. REVIEW PUSTAKA

*Duncan, J.M (2000)*; menguraikan mengenai analisis keandalan yang sangat sederhana. Contoh-contoh analisis keandalan dalam geoteknik dipresentasikan yang antara lain : persoalan stabilitas dinding penahan tanah, dan stabilitas lereng. Penyederhanaan-penyederhanaan persoalan dikemukakan pada penelitian tersebut. *Foye et.al (2006)* meneliti mengenai penilaian terhadap ketidakpastian variabel-variabel perencanaan pondasi dengan hasil bahwa LRFD merupakan pendekatan alternatif yang cukup baik dibanding dengan perencanaan berdasarkan WSD. Kelebihan LRFD dibanding dengan WSD adalah kemampuannya dalam menjaga konsistensi keandalan dengan mempertimbangkan ketidakpastian beban dan ketahanan secara terpisah. *Massih, et.al (2008)* mengusulkan pendekatan analisis dan perencanaan berdasar keandalan untuk pondasi lajur tanpa atau dengan pembebanan pseudostatik. Parameter-parameter geser tanah diasumsikan sebagai variabel-variabel acak. *Haldar, S. et.al (2008)* mengusulkan suatu prosedur analisis angka keamanan parsial untuk pondasi tiang dengan mempertimbangkan adanya penyimpangan dan ketidakpastian pada parameter-parameter yang menentukan interaksi antara tanah dengan tiang. Penelitian tersebut menggunakan hasil pengujian load-settlement yang diperoleh dari data sekunder. Kapasitas ultimit tiang dihitung berdasarkan pada tiga kriteria keruntuhan. Ketidakpastian pada interaksi antara tanah dan tiang di modelkan dengan metode Monte Carlo.

*Massih (2008)* meneliti pendekatan keandalan untuk analisis dan perencanaan fondasi strip yang menerima beban vertikal dengan atau tanpa beban pseudostatik; hanya kerusakan akibat punching berdasarkan konsep ultimit yang dipelajari. Model-model deterministik dikembangkan berdasarkan metode batas atas. Variabel-variabel random yang diperhitungkan adalah parameter-parameter kuat geser tanah dan koefisien gempa arah horisontal. Pada penelitiannya menggunakan indeks keandalan yang dikembangkan oleh Lind & Hassoffer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa korelasi negatif antara parameter-parameter kuat geser tanah dengan keandalan fondasi meningkat, dan kemungkinan kegagalan sangat dipengaruhi oleh koefisien variasi sudut gesek dalam tanah dan koefisien gempa arah horisontal.

*Hatmoko, J.T., & Ali, J. (1999)* mengevaluasi berdasarkan keandalan sehubungan dengan model perencanaan lapis keras fleksibel menurut US Army Corps of Engineers. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa keandalan model perencanaan tersebut adalah 61% dengan anggapan bahwa data terdistribusi lognormal. Jika data diasumsi terdistribusi normal, keandalan model perencanaan sekitar 58%. *Hatmoko, J.T., & Ali, J (2001)* mengevaluasi berdasarkan keandalan mengenai faktor-faktor daya dukung pondasi dangkal. Penelitian tersebut mengambil sampel studi data pengujian tanah untuk Gedung Motor Perwita di Jln. Brigjen Katamso Yogyakarta. Hasil penelitian menunjukkan bahwa probabilitas kegagalan yang terjadi pada kondisi ultimit berada pada kisaran harga 50%, sedangkan pada kondisi yang paling aman probabilitas kegagalan bervariasi antara 1,18% sampai dengan 2,3%. *Hatmoko, J.T. dkk. (1999)*. Membuat model keandalan kelompok tiang, dengan anggapan tiang daktail kemudian membuat evaluasi berdasarkan moda unjuk kerja untuk menentukan probabilitas kegagalan suatu struktur yang didukung oleh kelompok tiang ditinjau dari 2-D maupun 3-D. Pemodelan ini juga menganalisis pengaruh 3-D pada batas-batas keandalan sistem seri dan paralel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa batas-batas keandalan untuk anggapan tiang liat lebih sempit dibanding dengan anggapan tiang kaku. Untuk analisis 3-D menghasilkan moda unjuk kerja yang lebih baik dibandingkan dengan pendekatan 2-D.

## 3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dibagi menjadi 2 tahap. Tahap pertama adalah pengujian di Laboratorium untuk menentukan sifat-sifat fisik tanah ( kadar air, gradasi, berat jenis dll.), serta menentukan parameter-parameter geser tanah di dalam alat geser langsung maupun triaksial. Kedua, menentukan faktor-faktor ketahanan secara teoritis sehubungan dengan variabel-variabel daya dukung tanah dasar. Dalam hal ini menentukan kerangka rasional mengenai evaluasi faktor-faktor ketahanan daya dukung tanah dasar pada tanah pasir.

### PENGUJIAN LABORATORIUM

#### 1. Pengujian kadar air

Pengujian kadar air dilakukan dengan menggunakan alat-alat : cawan dan oven dengan pengontrol temperatur yang akurat. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar air yang terkandung dalam tanah yang akan digunakan di dalam penelitian ini. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D2216-92 dan (ASTM Standard) SNI 1965 : 2008, dengan menggunakan alat-alat sebagai berikut: cawan dan oven dengan pengontrol temperatur yang akurat. Pengujian ini menggunakan 5 buah sampel tanah pasir yang diambil dari satu lokasi. Hasil dari kelima pengujian tersebut kemudian diambil harga reratanya.

## **2. Pengujian berat jenis.**

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat jenis tanah yang akan digunakan didalam penelitian. Standar yang digunakan untuk pengujian ini adalah : SNI 1964: 2008; AASHTO T100-70, dan ASTM D854-58. Analisis hasil pengujian menggunakan standar yang sama. Sampel yang diuji pada pengujian ini sebanyak 5 buah.

## **3. Pengujian analisis saringan**

Pengujian ini untuk mengetahui distribusi ukuran butir kedua jenis tanah yang dipakai didalam penelitian ini dan kemudian menentukan klasifikasi tanah tersebut menurut *Unified Soil Classification*. Referensi yang digunakan pada percobaan ini adalah : AASHTO T87-70 untuk persiapan sampel; AASHTO t88-70 untuk prosedur pengujian; ASTM D421-58 dan D422-63. Sedangkan untuk pengujian hidrometer menggunakan standar : AASHTO T87-70, T88-70, dan ASTM D421-59, dan D422-63. Pengujian ini menggunakan 5 buah sampel.

## **4. Pengujian geser langsung**

Pengujian ini dilakukan untuk mencari parameter geser tanah yaitu: kohesi dan sudut gesek dalam. Metode ini dilakukan pada kondisi tanah tida terkonsolidasi dan tidak terdrainase. Referensi dan metode pengujian ini mengikuti SNI 03-3420-1994; AASHTO 236-72 dan ASTM, 1982 D 3080-72.

## **URUTAN EVALUASI FAKTOR-FAKTOR KETAHANAN**

Kerangka pemikiran yang konsisten untuk mengevaluasi faktor-faktor ketahanan adalah pokok keberhasilan dalam implementasi LRFD. Untuk keperluan tersebut ada beberapa pendekatan seperti : faktor skala dan faktor yang ada pada konsep keamanan; menggunakan teori probabilistik sederhana dengan mempertimbangkan beberapa ketidakpastian; dan menunjukkan beberapa analisis probabilistik dengan mempertimbangkan semua parameter ketidakpastian. Hasil metode terakhir ini lebih dapat dipertanggung jawabkan dari pada metode-metode lain sebelumnya. Setelah kerangka model untuk menentukan faktor ketahanan dirumuskan, berikut adalah langkah-langkah yang diusulkan untuk penerapannya didalam geoteknik.

- 1) Identifikasi persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung ketahanan pondasi;
- 2) Identifikasi komponen-komponen variabel pada persamaan ketahanan;
- 3) Identifikasi besaran-besaran yang terukur yang dihasilkan dari pengujian geoteknik, yang berhubungan dengan variabel-variabel masukan.
- 4) Identifikasi semua komponen ketidakpastian untuk setiap variabel termasuk transformasinya.
- 5) Evaluasi ketidakpastian yang timbul dengan menggunakan statistik yang ada.
- 6) Gunakan ketidakpastian-ketidakpastian tersebut untuk menentukan PDF untuk keperluan analisis keandalan.
- 7) Pilih variabel-variabel perencanaan yang representatif : dimensi, beban, dan ketahanan.
- 8) Lakukan analisis keandalan untuk memperoleh faktor-faktor ketahanan.
- 9) Sesuaikan faktor ketahanan dengan faktor beban.
- 10) Ulangi analisis keandalan untuk mengkaver rentang kondisi perencanaan yang representatif.

## **INSTRUMEN UNTUK MENILAI KETIDAKPASTIAN**

### **1. Standar penyimpangan sampel**

Penyebaran dan ketidakpastian didalam pengukuran dan korelasi dapat dihitung dengan menggunakan standar penyimpangan, dimana standar penyimpangan populasi dapat didekati dengan standar penyimpangan sampel. Harga standar deviasi sampel ini, didalam teori probabilitas, dapat digunakan untuk mengestimasi standar deviasi populasi,  $\sigma$ . Di dalam praktek-praktek geoteknik, standar deviasi sering dinyatakan dengan koefisien variasi (COV) =  $\sigma/x^*$ . Penggunaan COV sebagai pengganti standar deviasi disebabkan oleh karena independensi COV terhadap  $x^*$ .

Pada assesmen variabel-variabel ketidakpastian akan diuraikan sebagai berikut. Ada beberapa hal dimana hubungan khusus antara dua buah variabel dapat ditentukan dari data; sebagai contoh jika ada data yang menunjukkan hubungan antara variabel X dan variabel Y. Suatu fungsi  $y = f(x)$  dapat didefinisikan, yang mewakili kecenderungan nilai rerata pada data tersebut. Trend atau kecenderungan tersebut dapat dianalisis dengan metoda kuadrat terkecil dan analisis regresi. Dalam hal ini perlu dievaluasi ketidakpastian hubungan antara X dan Y yang dapat dilakukan dengan mempertimbangkan penyebaran data pada harga y disekitar harga rerata yang diprediksi dengan  $y = f(x)$ .

### **2. Metode $N\sigma$ dan $6\sigma$**

Penyebaran pengukuran cenderung mengikuti trend distribusi normal. Distribusi normal adalah suatu tipe PDF yang dapat digambarkan secara jelas dengan menggunakan mean dan standar penyimpangannya. Beberapa data geoteknik seperti jumlah pukulan (N) pada SPT, dan nilai konus ( $q_c$ ) pada CPT memiliki ketergantungan dengan kedalaman. Metode  $6\sigma$  dapat menggambarkan evaluasi pada standar penyimpangan pada data yang memiliki trend tertentu. Langkah pertama adalah mengamati batas-batas data, dan reratanya. Sebagai contoh pada data hasil CPT ( $q_c$ ) atau nilai N pada SPT memiliki kecenderungan terhadap kedalmannya. Pada hasil tersebut untuk kedalaman tertentu

dapat dihitung rentang data (perbedaan antara batas nilai minimum dan nilai maksimumnya). Kemudian, standar deviasi dapat dihitung sebagai:  $\sigma = (\text{rentang data})/6$

Implikasi dari persamaan tersebut mempresentasikan bahwa rentang data sama dengan 6 X standar deviasi untuk distribusi normal. Hal ini sangat mungkin bahwa unuk beberapa hasil pengujian geoteknik, koefisien variasi (COV) akan bervariasi tergantung pada harga mean atau kedalamannya. Dengan demikian, akan sangat konservatif jika diambil harga COV terbesar untuk keperluan analisis keandalan. Harga  $6\sigma$  dapat dimodifikasi untuk menghindari pengambilan data yang konservatif.

Modifikasi harga  $6\sigma$  dapat digunakan jika data yang ada cukup kecil. Pada prosedur ini, batas-batas data dianggap mewakili angka standar penyimpangan  $N\sigma$  yang tergantung pada jumlah data (n).

**PENILAIAN KETIDAKPASTIAN DAYA DUKUNG PONDASI DANGKAL PADA TANAH PASIR**

Berikut adalah langkah 1 sampai dengan 6, pada urutan untuk mengevaluasi faktor-faktor ketahanan yang diterapkan pada pondasi dangkal yang dibangun diatas tanah pasir.

**Langkah 1: Identifikasi Persamaan Batas**

Persamaan untuk tanah pasir terdrainase sempurna digunakan pada penelitian ini. Untuk pondasi bujur sangkar pada tanah pasir, persamaan daya dukung untuk kondisi batas

$$\left( \frac{DL + LL}{B \times L} \right) - \frac{1}{2} \gamma \cdot B \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma} \cdot N_{\gamma} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

Persamaan diatas (1) menunjukkan kontrol perencanaan untuk mengontrol kemungkinan bahwa fondasi akan direncanakan berdasarkan teori daya dukung klasik. Analisis keandalan yang relevan dengan kontrol perencanaan ini harus memperhatikan kemungkinan bahwa daya dukung dievaluasi lebih kecil dari yang diperlukan untuk mendukung beban diatasnya.

**Langkah 2 : Identifikasi Variabel-variabel perencanaan**

Variabel-variabel pada persamaan diatas; B dan L ditentukan oleh perencana; DL dan LL adalah hasil perencanaan struktur atas;  $\gamma$  diperoleh dari laboratorium atau diestimasi, dan  $s_{\gamma} d_{\gamma} N_{\gamma}$  ditentukan menggunakan hubungan antara sudut gesek dalam, B, L dan d. Sudut gesek dalam  $\phi$  dapat diperoleh dengan eksperimen di laboratorium.

**Langkah 3 : Identifikasi Pengujian pengujian Tanah**

Dalam hal ini harus dilakukan pengujian-pengujian sondir (CPT) dan standar penetration test (SPT). Sebab korelasi-korelasi yang diidentifikasi pada langkah 2 yang menyangkut ketidak pastian pada harga N –SPT, tahanan konus qc akan berpengaruh pada ketidak pastian faktor-faktor , daya dukung, kedalaman, dan faktor bentuk  $N_{\gamma}; s_{\gamma}; \text{ dan } d_{\gamma}$

**Langkah 4: Identifikasi semua komponen ketidakpastian untuk setiap variable termasuk korelasinya**

Untuk beberapa variable, ketidakpastiannya sangat kecil seperti dimensi pondasi B dan L, berat volume tanah  $\gamma$ . Variabel-variabel tersebut dapat diabaikan dalam analisis ketidak pastian meyeluruh terhadap variable-variabel yang lain. Namun demikian, pada literature-literatur, ketidakpastian variable- variable tersebut masih diperhitungkan.

**Langkah 5 dan 6: Mengevaluasi ketidakpastian dan memilih PDF untuk analisis keandalan**

Untuk mencari ketidakpastian variabel terutama yang sudah ditransformai, digunakan integrasi numerik. Sebagai contoh: untuk menghitung histogram yang menggambarkan  $\phi$ , fungsi densitas didefinisikan sebagai variabel random terdistribusi normal.

**4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**IDENTIFIKASI PERSAMAAN BATAS**

Pendekatan model dilakukan untuk pondasi dangkal bentuk persegi panjang maupun lajur. Daya dukung tanah dasar digunakan persamaan Meyerhoff, dengan asumsi dasar pondasi terletak dimuka tanah (lihat gambar...)

Persamaan Meyerhof:

$$\begin{aligned} \text{Beban ..vertikal} & : \dots q_{ult} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q + 0.5 \gamma B \cdot N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma} \\ \text{Beban ..miring} & : \dots q_{ult} = c \cdot N_c \cdot i_c \cdot d_c + q \cdot N_q \cdot i_q \cdot d_q + 0.5 \gamma B \cdot N_{\gamma} \cdot i_{\gamma} \cdot d_{\gamma} \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

Persamaan batas  $q_{ult} = Q$ ; dengan  $Q = LL + DL$ , tanah pasir  $c = 0$ ; surface footing  $q = 0$ , maka persamaan batas menjadi:  $\frac{DL + LL}{B \times L} - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma} = 0$

DL dan LL adalah beban mati dan beban hidup yang terjadi pada struktur atas dan diteruskan ke pondasi. Beban mati memiliki COV yang sangat kecil, sehingga seringkali dalam analisis ketidakpastian diabaikan. Sedangkan beban hidup (LL) yang memiliki ketidakpastian cukup besar selalu diperhitungkan dalam analisis probabilitas (ketidakpastian) maupun keandalan. Faktor-faktor lain yang sehubungan dengan geometri, B dan L, memiliki faktor ketidakpastian kecil sehingga sering kali diabaikan didalam analisis probabilistik maupun analisis keandalan.

### KOMPONEN VARIABEL DAN IDENTIFIKASI PENGUJIAN YANG BERHUBUNGAN DENGAN SETIAP VARIABEL

Seperti disinggung dimuka bahwa variabel-variabel perencanaan B dan L yang ditentukan oleh perencana pada umumnya memiliki COV yang sangat kecil; demikian halnya dengan beban mati (DL) yang pada umumnya merupakan berat sendiri dari struktur tersebut. Sedangkan beban hidup (LL) pada umumnya memiliki COV yang cukup besar dikarenakan ketidakpastiannya.

Variabel-variabel daya dukung tanah dasar,  $N_{\gamma}$ ,  $s_{\gamma}$ ,  $d_{\gamma}$  sangat tergantung pada sudut gesek dalam  $\phi$  yang tergantung pada hasil pengujian di laboratorium. Demikian halnya mengenai berat volume tanah  $\gamma$ .

#### 1. Berat volume tanah ( $\gamma$ )

Hasil pengujian berat volume tanah yang dilakukan pada 7 buah sampel adalah sebagai berikut:

Rentang data =  $(20-17) = 3$ .....jumlah sampel  $n = 7$ ..... $N\sigma = 2,704$ , dengan demikian diperoleh standar penyimpangan  $\sigma = 3/2,704 = 1,109 \text{ kN/m}^3$ .  $COV = 1,109/18,129 = 0,0612$  cukup kecil. Hasil tersebut dapat dikontrol dengan analisis statistik biasa.

$$s = \sqrt{\frac{7,002}{(7-1)}} = 1,08 \text{ .....} COV = \frac{1,08}{18,129} = 0,05959$$

#### 2. Sudut gesek dalam ( $\Phi$ )

Tanah pasir yang diuji didalam alat uji geser langsung adalah pasir sedang dengan kisaran sudut gesek antara 27 derajat sampai dengan 36 derajat. Jumlah sampel yang diuji adalah 8(delapan) buah sampel ( $n = 8$ ), sehingga  $N\sigma = 2,8472$ . Diperoleh harga standar deviasi  $\sigma = \frac{(36 - 27)}{2,8472} = 3,161^{\circ}$

#### 3. $N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma}$

Variabel-variabel tersebut tergantung pada sudut gesek dalam ( $\Phi$ ), sehingga standar penyimpangan maupun COV-nya juga tergantung pada sudut gesek dalam. Semakin besar COV untuk  $\Phi$ , semakin besar juga COV untuk variabel-variabel tersebut. Koefisien variasi yang terjadi pada variabel tersebut cukup besar lebih dari 0.50. Kontribusi terbesar pada angka tersebut ditimbulkan oleh bervariasinya faktor daya dukung  $N_{\gamma}$  oleh berubahnya sudut gesek dalam. Hal ini disebabkan oleh karena hubungan antara sudut gesek dalam dengan  $N_{\gamma}$  bersifat eksponensial. Sedangkan rentang data untuk faktor bentuk maupun faktor kedalaman cukup kecil.

### IDENTIFIKASI SEMUA KOMPONEN KETIDAKPASTIAN UNTUK SETIAP VARIABEL

Untuk beberapa variabel, ketidakpastiannya sangat kecil, sehingga kontribusinya terhadap ketidakpastian pada daya dukung pondasi secara keseluruhan menjadi sangat kecil, dibandingkan dengan faktor-faktor yang lainnya. Variabel-variabel tersebut, sebagai misal berat volume tanah ( $\gamma$ ) ditentukan berdasarkan hasil eksperimen di laboratorium, sedangkan dimensi pondasi B dan L nilai COV-nya diambil dari literatur.

Ketidakpastian berat volume tanah ditentukan dengan eksperimen dengan menggunakan 7(tujuh)buah sampel dengan rentang data =  $(20-17) = 3$ , dengan menggunakan  $N\sigma = 2,704$ , diperoleh standar penyimpangan  $\sigma = 3/2,704 = 1,109 \text{ kN/m}^3$ .  $COV = 1,109/18,129 = 0,0612$  cukup kecil. Nilai COV tersebut sangat konservatif untuk dipertimbangkan sebagai faktor ketidakpastian. Untuk B dan L, diambil referensi ACI 117 (ACI 1990). Menurut ACI 117 tersebut, toleransi dimensi pondasi telapak empat persegi panjang (B x L) dengan lebar antara 610 mm dan 1830 mm antara -13/+152 mm. Pada dimensi pondasi, pendekatan konservatif untuk nilai COV-nya sangat diperlukan. Dengan demikian, jika digunakan metode  $6\sigma$ , harga terkecil B digunakan 610 mm, maka harga standar penyimpangan  $COV = 152/(6 \times 610) = 0,042$ . Harga tersebut juga secara konservatif diterapkan, oleh karena kecilnya ketidakpastiannya maka sering diabaikan dalam analisis keandalan.

Tabel 1. Ketidakpastian variabel-variabel perencanaan

Variabel	Jenis pondasi	PDF	Faktor bias	COV	Sumber
DL	Berlaku untuk semua jenis pondasi	Normal	1,05	0,15	Elingwood 1999
LL		Lognormal	1,15	0,25	Hatmoko, 2003
$\gamma$		Normal	1,05	0,06	Eksperimen
B, L		Normal	1,05	0,041	ACI 117 1990
$\phi$		Normal	1,03	0,0941	Eksperimen
$N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma}$	Persegi	Lognormal	1,40	0,5159	Analisis dari hsl eksperimen
$N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma}$	Persegi panjang	Lognormal	1,40	0,4919	Analisis dari hsl eksperimen
$N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma}$	lajur	Lognormal	1,50	0,4919	Analisis dari hsl eksperimen

Untuk toleransi yang dispesifikasikan ACI dimana batas atas secara substansial sangat jauh dari harga yang direncanakan dibandingkan dengan batas bawah, sehingga hal tersebut akan menimbulkan kecenderungan bahwa para perencana melakukan over perencanaan. Dengan demikian akan tepat jika digunakan faktor bias yang merupakan rasio antara harga rerata variabel perencanaan dengan harga nominalnya bias  $faktor = x^*/x_{nominal}$  untukantisipasi kecenderungan tersebut. Untuk dimensi pondasi telapak, sebagai contoh, yang cenderung dibangun melebihi perencanaannya, faktor bias akan lebih besar 1. Jika digunakan ACI 117, faktor bias untuk dimensi pondasi telapak diambil 1,05.

Beban hidup (LL) dan beban mati (DL) memiliki ketidakpastian yang memberikan pengaruh signifikans terhadap ketidakpastian daya dukung tanah secara keseluruhan. Ketidakpastian tersebut sudah dikaji secara mendalam oleh Elingwood(1999). Elingwood melaporkan bahwa COV dan faktor bias untuk DL adalah 0,15 dan 1,05; sedangkan untuk beban hidup (LL) 0,25 dan 1,15. Mengenai ketidak pastian dan faktor bias dapat dilihat pada tabel 1

Faktor bias dan COV  $N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma}$  secara keseluruhan sangat tergantung faktor bias dan COV dari sudut gesek dalam ( $\phi_p$ ). Tujuan ditentukannya ketiga faktor tersebut untuk mereproduksi dimensi pondasi telapak ( B dan L) yang cukup akurat yang ditentukan pada persamaan batas. Dengan demikian faktor kombinasi  $N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma}$  mewakili hasil perencanaan batas yang ketidakpastiannya memberikan kontribusi pada analisis keandalan. Harga  $N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma}$  pada kenyataannya dijamin oleh metode analisis batas terletak pada batas-batas sudut gesek dalam yang diberikan, oleh sebab itu probabilitas  $N_{\gamma} \cdot s_{\gamma} \cdot d_{\gamma}$  pada batas tersebut mendekati seratus prosen. Berdasarkan pada kondisi tersebut, PDF yang paling tepat untuk variabel tersebut adalah distribusi lognormal.

Untuk pondasi lajur, bujur sangkar dan empat persegi panjang, dirumuskan dngan PDF yang berbeda dengan alasan bahwa ketidakpastian untuk masing-masing bentuk pondasi berbeda. Ketidakpastian pada pondasi lajur lebih kecil bila dibandingkan dengan pondasi bujur sangkar atau pondasi empat persegi panjang. Perbedaan tersebut terjadi karena pada pondasi lajur dapat dipandang sebagai 2 dimensi, sedangkan pondasi bujur sangkar atau pondasi empat persegi panjang harus dilihat sebagai 3 dimensi. Demikian halnya, ketidakpastian pondasi empat persegi panjang lebih besar dari pondasi bentuk bujur sangkar disebabkan bahwa geometri pondasi bujur sangkar dapat direduksi.

Pada tahapan ini, ketidakpastian semua variabel yang relevan dengan pengujian-pengujian geoteknik, transformasi dan variabel-variabel lain yang berhubungan sudah dijelaskan. Tahapan berikutnya adalah menggabung semua ketidakpastian untuk merumuskan PDF semua variabel yang ada pada persamaan batas (persamaan 7).

## GABUNGAN KETIDAKPASTIAN VARIABEL DAN PEMILIHAN PDF

### 1. Harga nominal harga rerata dan faktor bias

Harga rerata berhubungan langsung dengan nilai harapan (expeced value) pada suatu variabel random. Untuk pengukuran, harga ini ditentukan dengan mengambil nilai rerata dari satu data atau dengan menemukan kecenderungan nilai rerata dari suatu data. Untuk harga variabel yan ditransformasi Y, harga rerata  $y^*$  diambil

sebagai nilai harapan  $Y$  sesuai dengan PDF  $p_Y(y)$  atau dari histogram yang mempresentasikan PDF  $p_Y(y)$ . Pada beberapa kasus perencanaan geoteknik, parameter yang digunakan pada perencanaan adalah harga nominal, yang kemungkinan akan berbeda dengan harga rerata. Pada kasus-kasus tersebut, digunakan faktor bias yang menggambarkan perbedaan tersebut. Faktor bias dirumuskan sebagai berikut : faaktor bias =  $y^*/y_{\text{nominal}}$

Perbedaan antara harga nominal dan harga rerata disebabkan oleh , pertama beberapa persamaan yang digunakan dalam perencanaan sudah diketahui bias. Pada kasus-kasus tersebut, faktor bias digunakan untuk mengoreksi suatu harga yang ditentukan dari persamaan perencanaan yang diketahui biasanya, sehingga harga rerata secara statistik dari parameter perencanaan menggambarkan pengertian terbaik yang harus dilakukan oleh perencana. Kedua, transformasi tidak linier  $y = f(x)$  menghasilkan PDF  $p_Y(y)$  yang ditransformasi dengan bentuk yang berbeda dengan PDF masukan  $p_X(x)$ . Perubahan bentuk juga merubah harga rerata sehingga  $E(Y) \neq f\{E(X)\}$  Sebagai contoh, fungsi nonlinier  $y = f(x)$  yang memiliki derivatif kedua positif cenderung menghasilkan harga :  $E[Y] > f\{E(X)\}$ . Peningkatan tersebut dihasilkan oleh peningkatan relatif dari momen pertama fungsi distribusi. Untuk harga nominal yang diberikan, harga rerata dapat dihitung dengan persamaan 18 setelah faktor bias dievaluasi. Terakhir yang diterangkan pada gambar 2 adalah harga batas. Harga batas adalah suatu harga parameter perencanaan yang dibutuhkan untuk mencapai harga batas tertentu.

## 2. Pemilihan PDF untuk Analisis Keandalan

Integrasi numerik pada persamaan 15 digunakan untuk menentukan ketidakpastian setiap variabel yang ditransformasi,  $\phi$ , dan  $N_{\gamma}, s_{\gamma}, d_{\gamma}$  yang pada akhirnya dapat ditentukan PDF untuk setiap variabel perencanaan. Bentuk-bentuk histogram yang diturunkan dari integrasi numerik pada persamaan 15 digunakan untuk menentukan PDF yang representative untuk setiap variabel. Histogram variabel  $\phi$  menyerupai distribusi normal, sedangkan  $N_{\gamma}, s_{\gamma}, d_{\gamma}$  menyerupai distribusi log-normal. Nilai rerata dan COV yang diperoleh dari histogram tersebut dapat digunakan untuk mendefinisikan PDF untuk setiap variabel. Distribusi untuk masing-masing variabel dapat dilihat pada tabel 1.

Setiap PDF tersebut tidak secara penuh digambarkan tanpa mempertimbangkan bahwa bias faktor sangat diperlukan. Seperti dijelaskan dimuka, pada saat didiskusikan mengenai faktor bias, faktor buias untuk  $N_{\gamma}, s_{\gamma}, d_{\gamma}$  diperlukan disebabkan oleh pengaruh transformasi linier dari persamaan daya dukung. Seperti telah diketahui bahwa harga faktor-faktor daya dukung tanah nsangat tergantung pada nilai konus.

## 5. KESIMPULAN

- Untuk menjelaskan variabel-variabel ketidakpastian didalam perencanaan berdasarkan keandalan/*reliability based design (RBD)* digunakan fungsi-fungsi distribusi probabilitas.
- Sumber-sumber ketidakpastian ditimbulkan oleh parameter-parameter beban dan parameter-parameter ketahanan.
- Histogram dari beban hidup pada umumnya menyerupai distribusi lognormal dengan faktor bias relatif tinggi (1,15), sedangkan ketidakpastian beban mati mirip dan mendekati distribusi normal dengan faktor bias sangat rendah – mendekati 1.
- Dimensi pondasi ( lebar dan panjang) memilki faktor bias sangat rendah ( 1,05) dengan histogram mendekati distribusi normal.
- $N_{\gamma}, s_{\gamma}, d_{\gamma}$  untuk semua jenis pondasi mendekati distribusi log-normal. Namun demikian, faktor bias berbeda beda unuk setiap jenis pondasi yang ditinjau. Pondasi lajur 1,50 ; pondasi pesegi dan pondasi pesegi panjang memiliki faktor bias sama 1,40.

## DAFTAR PUSTAKA

1. AASHTO(1998):"LRFD bridge design specifications" 2<sup>nd</sup> edition, Washington, D.C.
2. American Concrete Institute (ACI) (1990):"Standard Specifications for tolerances for concrete construction and materials" 117-90, Detroit USA.
3. Ang , A.H.S., and Tang,W-H.(1975):" Probability concepts in engineering planning and design : basic principles", vol. I, John Willey and sons, New York.
4. Bolton, M.D., (1986) : " The strength and dilatancy of sands" *Geoteqnique*, 36,65-78.
5. Christian, J.T., Ladd, C.C (1994). " *Reliability Applied to slope stability analysis*" Journal of Geotechnical Engineering; 20; Dec; pp.2180 – 2207.

6. Tang., W. H; (1999) : “*Reliability in back analysis of slope failure*” *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, October
7. 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.
8. Ellingwood, B., (1999):”Wind load statistics for probability-based structural design” *Journal of Structural Engineering*, vol.125, No. 4.
9. Foye,K.C; et.al, 2006: *Assessment of Variables Uncertainties for Reliability-Based Design of Foundations*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 9, September 2006, pp.1197-1207
10. 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
11. 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
12. 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
13. Hatmoko, J.T; Susanto, B, & Supriyadi, D.S. (1999): “ *Model Keandalan Sistem Kelompok Tiang*”. Laporan Studi, LPPM Universitas Atma Jaya Yogyakarta
14. Hatmoko, J.T; Lulie,Y (2003): “ *Surety Beban Hidup untuk Bangunan Sekolah di Daerah Istimewa Yogyakarta*”. Laporan Studi, LPPM Universitas Atma Jaya Yogyakarta
15. Perkins, S., and Madson,C. (2000):”Bearing capacity of shallow foundations on sands : A relative density approach” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(6), 521-530.