

# THE PROBABILITY DESIGN OF PILE FOUNDATION (DESIGN PONDASI TIANG DENGAN PRINSIP PROBABILITAS)

Anto Budi Listyawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lecturer, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Universitas Muhammadiyah Surakarta,  
email: anto\_beel@yahoo.com

## ABSTRACT

Probabilistic design began more realistic solution compare to the conventional deterministic design as it can describe and accommodate of soil variability. Although the old approach is widely used, it is confirmed, that almost all natural soils are spatially variable in their properties and rarely homogenous. This paper focuses on the analysis and design of pile foundation on the project of SMK Muhammadiyah Sukoharjo based on the probabilistic theory. The research begins with a certain preliminary analysis to prepare the probabilistic analysis of Pile Foundation design by characterizing the tip resistance on 3 CPTs data taken from the site. It involves an extensive analysis to perform the best-fit distribution of pointwise variability of tip resistance using computer program written in MATLAB. The next step is deriving the point statistics (i.e. mean, standard deviation, and coefficient of variation) across the site. Finally, a certain monte carlo analysis using CRYSTAL BALL computer program is carried out to design the pile foundation by inputting all data taken from MATLAB analysis. The pile is installed in 10m depth with the thickness of cap and the diameters of pile are 0.4m and 0.3m respectively. The pile experiences a 140 tones vertical load. The results show that, there is no objection to the hypothesis of normality in the chi-square analysis, although the best fit distribution for each profile or 6 profiles which collected at once are varying (i.e. normal, log-normal, gamma). Compare to the deterministic analysis, the probabilistic design needs more pile to resist the vertical load in a safety factor of 2.5 and confident limit 95%. Furthermore, the higher variation of CPT data the larger number of pile is desired.

**Keywords:** CPT, probabilistic, deterministic, pile, MATLAB, CRYSTAL BALL

## PENDAHULUAN

Dalam setiap bangunan diperlukan pondasi sebagai dasar bangunan yang kuat dan kokoh, sehingga mampu memikul seluruh beban bangunan dan beban lainnya untuk diteruskan sampai ke lapisan tanah pada kedalaman tertentu. Seperti halnya pada pembangunan gedung SMK Muhammadiyah Sukoharjo yang mempunyai karakteristik tanah lunak pada lokasi pembangunannya, diharapkan mempunyai pondasi yang kokoh, dapat memikul seluruh beban bangunan di atasnya. Jenis pondasi yang sesuai dengan tanah pendukung yang terletak pada kedalaman 10 meter di bawah permukaan tanah adalah fondasi tiang. (Sosrodarsono dan Nakazawa, 1990). Tingkat variasi karakteristik tanah hasil uji sondir pada pembangunan gedung SMK Muhammadiyah Sukoharjo dan analisis pondasi tiang dengan mengakomodasi tingkat variasi data sondir adalah permasalahan yang akan diselidiki pada penelitian ini dengan menggunakan program komputer *Matlab* dan *Crystal Ball 7.0*. Penelitian serupa sebelumnya pernah dilakukan oleh Sutrisno (2009), dengan judul Analisa Stabilitas Lereng Dengan Metode *Fellinius* Berdasarkan Teori Probabilitas. Dengan kesimpulan "Dari hasil analisis dapat dilihat bahwa hasil yang paling fit adalah distribusi log normal dengan hasil  $\chi^2$  normal (0,5199)  $< \chi^2$  9;0.05 (16,919) didapat dari tabel nilai distribusi  $\chi^2$  artinya data distribusi normal dapat dipakai".

### Teori Reliabilitas di Ilmu Geoteknik

Reliabilitas adalah tingkat keterpercayaan hasil suatu pengukuran. Pengukuran yang memiliki reliabilitas tinggi, yaitu pengukuran yang mampu memberikan hasil ukur yang terpercaya (*reliable*). Ide pokok dalam konsep reliabilitas adalah sejauh mana hasil suatu pengukuran dapat dipercaya, artinya sejauh mana skor hasil pengukuran terbebas dari kekeliruan pengukuran (*measurement error*). Sekitar tahun 1970an desain bangunan tanah dalam ilmu geoteknik mulai mengakomodasi teori reliabilitas ini.

### Uji Chi-Kuadrat

Uji Chi-Kuadrat adalah pengujian hipotesis mengenai perbandingan antara frekuensi *observasi* yang benar-benar terjadi atau aktual dengan frekuensi harapan atau *ekspektasi*. Uji Chi-Kuadrat dapat dipakai untuk menentukan sejauh mana distribusi-distribusi teoritis, seperti distribusi normal, gamma, beta, log-normal dan seterusnya, sesuai dengan distribusi-distribusi empiris yang diperoleh dari data sampel. Uji Chi-Kuadrat didasarkan pada sejauh mana kesesuaian antara frekuensi-frekuensi yang diamati dengan frekuensi-frekuensi yang diharapkan muncul dari distribusi yang diperkirakan sebelumnya, yang dapat dihitung dengan formula di bawah ini:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan :

- $\chi^2$  = Chi kuadrat
- $o_i$  = Frekuensi pengamatan
- $e_i$  = Frekuensi yang diharapkan

### Analisis Kapasitas Pondasi Tiang

Tahanan ujung tiang diambil pada nilai  $q_c$  rata-rata yang dihitung dari 8d di atas dasar tiang sampai 4d di bawah dasar tiang. Tahanan gesek per satuan luas ( $f_s$ ) dari tiang pancang, secara aman, dapat diambil sama dengan tahanan gesek selimut sondirnya ( $q_f$ ) (Bagemann, 1965) dalam Hardiyatmo, 2003.

$$f_s = q_f \dots\dots\dots (2)$$

$$f_s = q_c / 200 \dots\dots\dots (3)$$

Dengan,

- $f_s$  = tahanan gesek dinding satuan ( $kg/cm^2$ ).
- $q_c$  = tahanan penetrasi kerucut statis rata-rata ( $kg/cm^2$ ).

Kapasitas ultimit tiang pancang, dinyatakan dalam persamaan :

$$Q_u = A_b \cdot q_c + A_s \cdot f_s \dots\dots\dots (4)$$

Dengan,

- $Q_u$  = kapasitas ultimit tiang (kg)
- $A_b$  = luas ujung bawah tiang ( $cm^2$ ).
- $A_s$  = luas selimut tiang ( $cm^2$ ).
- $q_c$  = tahanan penetrasi kerucut statis ( $kg/cm^2$ ).

Untuk memperoleh kapasitas ijin tiang ( $Q_a$ ), maka diperlukan untuk membagi kapasitas ultimit tiang dengan faktor aman (SF) tertentu. Faktor aman (SF) pondasi tiang diambil nilai 2,5 – 3, untuk penelitian ini diambil besar faktor aman (SF) adalah 2,5.

$$\text{Kapasitas tiang ijin } (Q_a) = Q_u / \text{SF} \dots\dots\dots (5)$$

Jumlah tiang dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$n = P / Q_a \dots\dots\dots (6)$$

Dengan,

n = jumlah tiang.

P = beban total (kg).

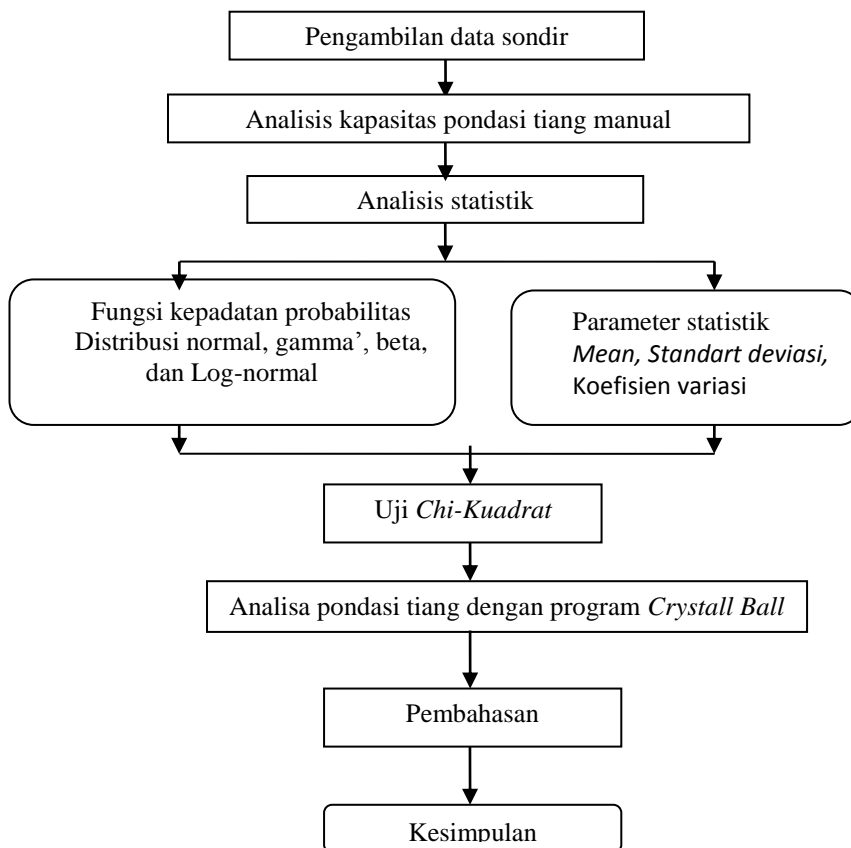
$Q_a$  = kapasitas tiang ijin (kg).

SF aktual

$$\text{SF} = (n \cdot Q_u) / P \dots\dots\dots (7)$$

## METODE PENELITIAN

Pada penelitian kali ini permasalahan yang diangkat adalah menganalisis data CPT-Test dengan mengakomodasi segala variasi yang muncul ke dalam bentuk distribusi frekuensi. Kemudian menggunakan hasil distribusi frekuensi untuk perancangan pondasi tiang dengan menggunakan prinsip probabilitas. Data Penelitian yang diperlukan yaitu data CPT-Test SMK Muhammadiyah Sukoharjo dengan analisa 3 titik penyondiran. Alat Bantu Penelitian adalah Program *MATLAB*, Program *Crystal ball*, Program Gambar ( *Autocad 2007*), Program Microsoft Office 2007. Penelitian ini dilakukan dengan tahapan seperti bagan berikut ini :



**Gambar 1.** Bagan alir penelitian.

## ANALISA DAN PEMBAHASAN

### Analisis Kapasitas Pondasi Tiang Manual

Data pondasi tiang adalah sebagai berikut :

Kedalaman pemancangan pada kedalaman 10 meter.

Diameter tiang (d) = 0,3 meter.

Kedalaman pelat penutup tiang (*pile cap*) = 0,4 meter.

Beban total (P) = 140 ton = 140000 kg.

**Tabel 1.** Hasil hitungan pondasi tiang manual.

	S1	S2	S3	Gabungan
Qu (kg)	47799.945	61496.13	57073.63	55456.806
Qa (kg)	19119.978	24598.452	22829.45	22182.72
Jumlah tiang (n)	8	6	7	7
SF actual	2.73	2.63	2.85	2.77

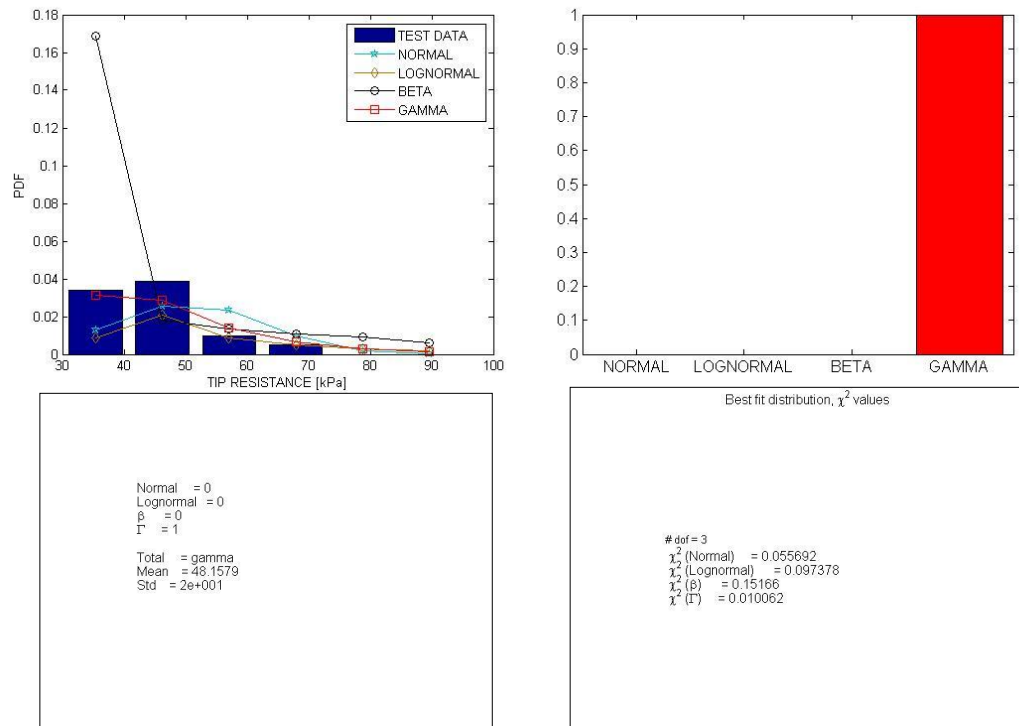
### Analisis Statistik

#### 1. Persiapan Data Pada Program Matlab

Karena jumlah data terlalu kecil atau sedikit yaitu 19 data, maka penentuan jumlah kelas ditentukan sendiri yaitu 6, untuk penentuan jumlah kelas harus memenuhi syarat banyaknya selang kelas yang diambil antara 5 dan 20 (Spiegel, 1984), maka jumlah kelas tersebut telah memenuhi syarat.

#### 2. Nilai Chi-kuadrat ( $\chi^2$ )

Selain hasil nilai total, *mean*, *standard deviasi* dari uji statistik juga menghasilkan nilai  $\chi^2$  (Chi-kuadrat) *best fit distribution* pada tahanan ujung konus ( $q_c$ ). Dengan hasil sebagai berikut :



**Gambar 2.** Grafik uji statistik untuk titik 1 (S1).

**Tabel 2.** Hasil uji statistik untuk nilai  $\chi^2$  best fit distribution ( $q_c$ ).

Titik	S1 $\chi^2$	S2 $\chi^2$	S3 $\chi^2$	Gabungan $\chi^2$
Normal	0.055692	0.085398	0.081331	0.11266
Log normal	0.097378	0.067114	0.26496	0.0051424
Beta ( $\beta$ )	0.15166	0.072929	0.10877	0.23378
Gamma ( $\Gamma$ )	0.010062	0.0089547	0.11839	0.60799

### 3. Uji Chi-kuadrat ( $\chi^2$ )

Uji Chi-kuadrat dapat dipakai untuk menentukan sejauh mana distribusi-distribusi teoritis, seperti distribusi normal, gamma, beta, log normal dan seterusnya. Sesuai dengan distribusi-distribusi empiris yang diperoleh dari data sample (Spiegel, 1994). Penentuan level of significance ( $\alpha$ ). Dalam penelitian ini menggunakan nilai  $\alpha = 0,05$ . Kriteria pengujian adalah jika  $\chi^2 \leq \chi^2(\alpha; d.b)$  maka diterima, jika  $\chi^2 \geq \chi^2(\alpha; d.b)$  maka ditolak.

d.b ( $v$ ) =  $k-1-m$

keterangan,  $v$  = Derajat kebebasan.

$k$  = jumlah kelas.

$m = 2$

**Tabel 3.** Perhitungan  $\chi^2$  best fit distribution ( $q_c$ ) pada setiap titik dan gabungan.

Titik	$\alpha$	k	d.b ( $v$ )	$\chi^2$ ( $\alpha; d.b$ )	Nilai $\chi^2$ distribusi normal	Kesimpulan
S1	0.05	6	3	7.81473	0.055692	Normal
S2	0.05	6	3	7.81473	0.085398	Normal
S3	0.05	6	3	7.81473	0.081331	Normal
Gabungan	0.05	6	3	7.81473	0.11266	Normal

### Parameter-parameter Statistik.

Parameter statistik hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel di bawah ini :

**Tabel 4.** Perhitungan nilai statistik untuk setiap titik dan gabungan semua titik.

Parameter	S1	S2	S3	Gabungan
Mean ( $\mu$ ) kg/cm <sup>2</sup>	48,158	65	56,211	56,456
Standard deviasi ( $\sigma$ ) kg/cm <sup>2</sup>	14,619	33,678	18,9197	22,4055
Koefisien variasi (V)	0.304	0.518	0.337	0.397

### Analisa Pondasi Tiang dengan Metode Probabilitas Menggunakan Program *Crystal Ball*

*Crystal Ball* terdapat kemampuan menghitung, visualisasi, pemodelan, simulasi, algoritma, probabilitas, serta analisa data. Data-data yang dimasukkan dalam program *Crystal Ball* dengan rumus sebagai berikut :

$$Q_u = A_b \cdot q_c + A_s \cdot f_s$$

$$Q_a = Q_u / SF$$

$$n = P / Q_a$$

$$SF_{akt} = (n \cdot Q_u) / P$$

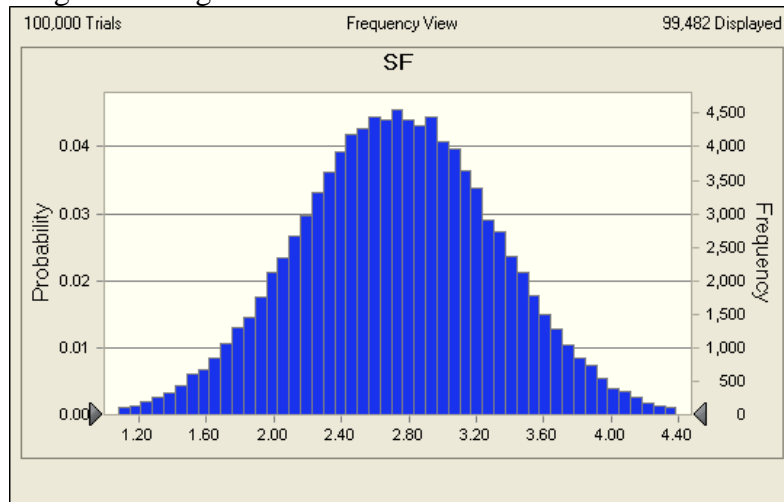
Pada perhitungan *Crystal Ball* diperoleh grafik yang menunjukkan besarnya SF dengan jumlah tiang yang dipilih. Target akhir dari analisis *Crystal Ball* dilakukan trial eror jumlah tiang sedemikian hingga 90% - 95% nilai SF lebih besar dari 2,5.

Hasil analisis dari program *Crystal Ball* dengan percobaan sebanyak 100000 kali dapat dilihat pada grafik sebagai berikut :

**1. Perhitungan pada titik 1 (S1).**

Dengan menggunakan nilai *standard deviasi* ( $\sigma$ ) = 14,619 dan nilai *mean* ( $\mu$ ) = 48,158, jumlah tiang 8 buah.

Maka, diperoleh grafik sebagai berikut :

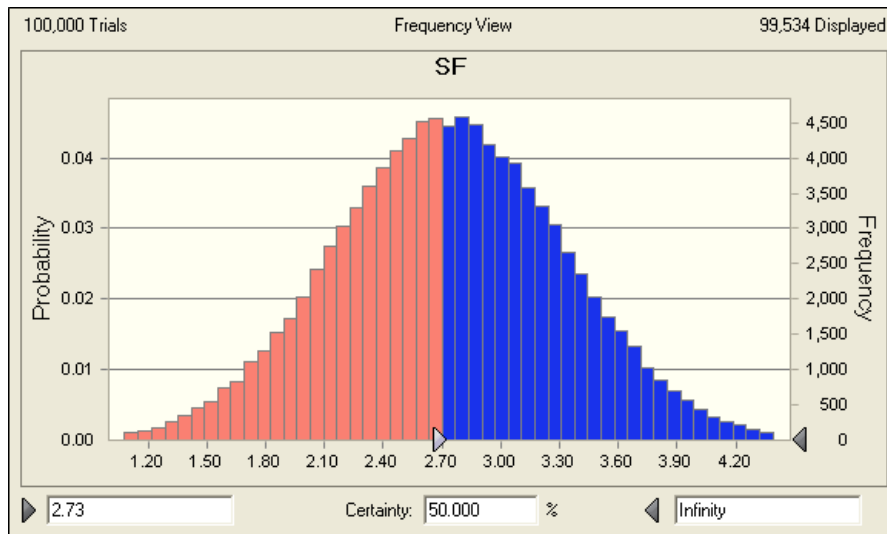


**Gambar 3.** Grafik frekuensi awal pada titik 1 (S1).

100,000 Trials		Statistics View		99,508 Displayed	
Statistic		Forecast values			
Trials				100,000	
Mean				2.73	
Median				2.73	
Mode				...	
Standard Deviation				0.59	
Variance				0.35	
Skewness				0.0082	
Kurtosis				2.99	
Coeff. of Variability				0.2167	
Minimum				0.23	
Maximum				5.53	
Mean Std. Error				0.00	

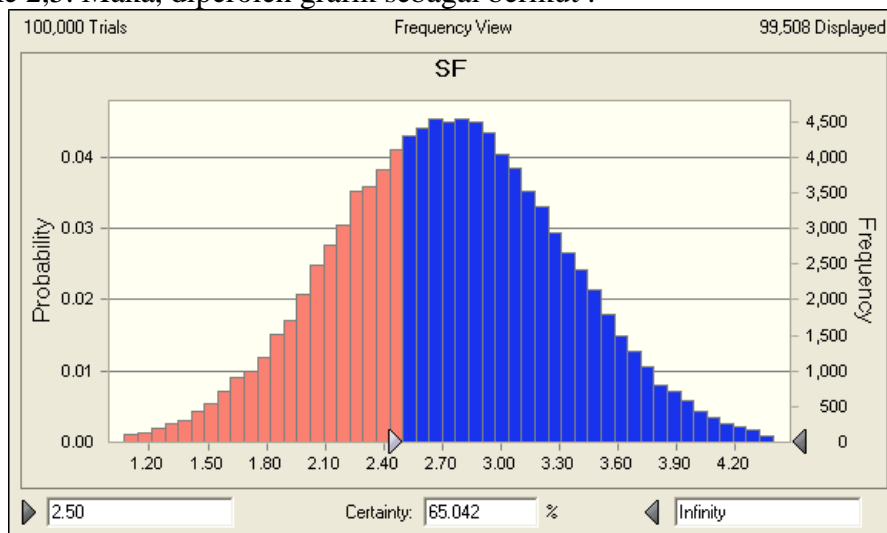
**Gambar 4.** Hasil uji statistik pada titik 1 (S1).

Dari gambar 3 terlihat mean (rerata) SF adalah 2,73 sama dengan perhitungan manual atau deterministik, dengan kata lain dari gambar 5 terlihat bahwa 50% SF akan berada di kiri 2,73 atau kurang dari 2,73.



**Gambar 5.** Grafik frekuensi 50% SF pada titik 1 (S1).

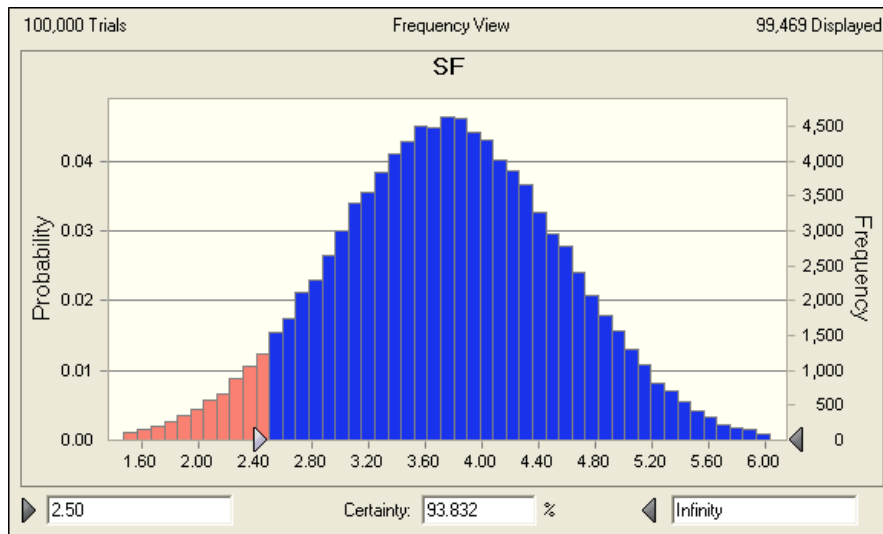
Dengan menggunakan data jumlah tiang yang sama (8 buah) kemudian nilai SF dari kiri digeser ke 2,5. Maka, diperoleh grafik sebagai berikut :



**Gambar 6.** Grafik frekuensi dengan nilai SF (2,5) pada titik 1 (S1).

Dari gambar di atas terlihat bahwa 65,042%  $SF > 2.5$ , dengan kata lain diperoleh tingkat keyakinan kestabilan bangunan pondasi mampu menahan beban di atasnya sebesar 65,042% dengan tetap menggunakan jumlah tiang sebanyak 8 buah.

Kemudian trial eror dilakukan dengan merubah jumlah tiang dengan 90% - 95%  $SF > 2.5$ . Dengan menaikkan jumlah tiang menjadi 11 buah, diperoleh grafik sebagai berikut :



**Gambar 7.** Grafik frekuensi akhir pada titik 1 (S1).

Dari gambar di atas, dinyatakan tingkat keyakinan kestabilan bangunan pondasi mampu menahan beban di atasnya sebesar 93,832% dengan menggunakan jumlah tiang sebanyak 11 buah.

**Tabel 5.** Rekapitulasi hasil data semua titik dan gabungan semua titik.

No	Titik	Jumlah tiang		Tingkat keyakinan (%)
		Deterministik	Probabilitas	
1	S1	8	11	93.832
2	S2	6	12	91.370
3	S3	7	9	91.282
4	Gabungan	7	10	90.267

Dari tabel di atas dapat dilihat perbedaan antara hasil dari perhitungan manual dengan perhitungan analisis probabilitas. Untuk titik 1 (S1) jumlah tiang mengalami tingkat kenaikan sebesar 37,5%, untuk titik 3 (S3) mengalami kenaikan 28,57%, untuk gabungan semua titik mengalami kenaikan 42,85%, dan untuk titik 2 (S2), terlihat kenaikannya cukup besar yaitu 100%, hal ini dikarenakan nilai koefisien variasinya besar, dengan kata lain, tingkat variasi datanya tinggi, jadi hal ini yang menyebabkan kenaikan jumlah tiang yang sangat besar dibanding pada titik sondir lainnya pada perhitungan probabilitas.

## KESIMPULAN

Dari hasil analisis dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Dari hasil analisis program *Matlab 7.0* dapat dilihat bahwa hasil untuk nilai  $q_c$  pada titik 1 (S1) nilai distribusi yang paling mewakili adalah pada Gamma, pada titik 2 (S2) nilai distribusi yang paling mewakili adalah pada Gamma, pada titik 3 (S3) nilai distribusi yang paling mewakili adalah pada Normal, dan pada gabungan semua titik nilai distribusi yang paling mewakili adalah pada Log normal.



- 2) Dari hasil analisis program *Matlab 7.0* dapat dilihat bahwa hasil yang paling fit (*best fit distribution*) pada semua titik dan gabungan semua titik  $< \chi^2 (0.05 ; 3) (7,81473)$  didapat dari tabel nilai distribusi  $\chi^2$ , artinya data distribusi normal dapat dipakai.
- 3) Dari hasil analisis program *Crystal Ball*, untuk nilai SF (2,5) dengan tingkat keyakinan 90% - 95% didapat jumlah tiang yang lebih banyak dibandingkan dengan cara deterministik.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Barnes, J. Wesley, 1994, *Statistical Analysis For Engineers and Scientist*, 2<sup>nd</sup> ed, McGraw-Hill Inc, Singapore.
2. Beacher, G.B. and Christian, J.T. 2003, *Reability and Statistics in Geotechnical Engineering*, 1<sup>st</sup> ed. John Wiley & Sons Ltd, England.
3. Bowles, J.E, 1991, *Sifat-sifat Fisis Tanah dan Geoteknis Tanah*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
4. Das, B.M, 1994, *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
5. Hardiyatmo, H.C, 2002, *Mekanika Tanah I (edisi III)*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
6. Hardiyatmo, H.C, 2003, *Teknik Fondasi II (edisi II)*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
7. Hogg,V. And Ledolter, J. 1987, *Applied Statistics for Engineers and Physical Scientists*, 2<sup>nd</sup> ed. New York.
8. Listyawan, A.B. (2006). *Statistical Characterisation of Spatial Variability of Jamuna River Sand*. Msc. Dissertation, University of Manchester, UK.
9. Listyawan, A.B. (2009). *Rekayasa Pondasi 2*. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta.
10. Maia, R.R, 2009, *Uji Statistik Tingkat Variabilitas Data Sondir Dengan Program MATLAB 7.0*, Tugas Akhir, S1 Teknik Sipil, UMS.
11. Sosrodarsono, dan Nakazawa, 1990, *Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi*, PT Pradnya Paramita, Jakarta.
12. Spiegel, 1972, *Statistik Versi S1 (Metrik)*, Erlangga, Jakarta.
13. Sutrisno, 2009, *Analisa Stabilitas Lereng Dengan Metode Fellinius Berdasarkan Teori Probabilitas*, Tugas Akhir, S1 Teknik Sipil, UMS

*“ Halaman ini sengaja dikosongkan ”*