

## TAHANAN LATERAL PONDASI TIANG BERDASAR *CONE PENETRATION TEST*

Sumiyati Gunawan<sup>1</sup>, Niken Silmi Surjandari<sup>2</sup>, dan Bambang Setiawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta

<sup>2</sup> Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta

E-mail: sumiyatig@student.uns.ac.id, nikensilmisurjandari@staff.uns.ac.id,

bambangsetiawan@staff.uns.ac.id

**Abstrak:** Kapasitas beban lateral pondasi tiang ( $P_u$ ) merupakan hal utama untuk perencanaan konstruksi dengan beban lateral yang cukup dominan. Kapasitas  $P_u$  didasarkan pada kondisi keseimbangan resultan gaya pada tiang dan ketahanan tanah lateral serta distribusi tekanan tanah  $P_L$  sepanjang kedalaman tiang berdasarkan metode konvensional, tetapi sulit diterapkan pada tanah *nonhomogen*, karena kondisi tanah *nonlinier* terhadap kedalaman. *Insitu test* yang paling sering digunakan karena mudah, cepat dan hemat biaya adalah *cone penetration test* (CPT), yang memberikan profil tanah secara kontinu, dan lebih mendefinisikan jenis lapisan, ketebalan, dan kepadatan dari masing-masing lapisan. Meskipun jarang disebut dalam literatur tentang penggunaan data CPT untuk menganalisa perilaku defleksi pondasi tiang, beberapa peneliti menyatakan hubungan antara resistensi kerucut  $q_c$  dan tahanan lateral tanah  $P_u$  di sepanjang kedalaman tiang. Salah satu metode yang menyajikan pengembangan metode kurva  $p-y$  untuk pondasi tiang dengan dasar resistensi penetrasi kerucut  $q_c$  adalah Bouafia, A. (2014). Berdasarkan pengembangan oleh Bouafia, penulis menganalisa hubungan antara resistensi kerucut  $q_c$  dan ketahanan lateral tiang  $P_u$  untuk menentukan beban lateral pondasi tiang pada tanah lunak di Wates, Kulon Progo DIY dan dibandingkan dengan teori Broms 1964; metode Kurva  $p-y$ , dan pengembangan rumus Bouafia, dengan kekakuan tiang, jenis tanah dan defleksi maksimum yang sama maka diperoleh sebagai berikut, teori Broms,  $L_{Broms}=14,16m$  ;  $P_{uBroms}=32,4ton$  ;  $M_{Broms}=19,88tonm$ . Metode Kurva  $p-y$ ,  $L_{p-ycurve}=14,4m$  ;  $P_{u-p-ycurve}=28,0ton$  ;  $M_{p-ycurve}=7,50tonm$  dan Metode Bouafia,  $L_{Bouafia}=17,9m$  ;  $P_{uS2bouafia}=34ton$ ;  $P_{uS4bouafia}=14,8ton$ ;  $M_{S2bouafia}=11,3tonm$  ;  $M_{S4bouafia}=4,9tonm$ .

**Kata Kunci:** tanah lunak, resistensi kerucut, , ketahanan tanah lateral

### PENDAHULUAN

Pondasi adalah suatu konstruksi bawah yang berfungsi meneruskan beban dari struktur atas ke lapisan tanah pendukung. Pondasi tiang (*Pile*) adalah bagian suatu konstruksi pondasi yang berbentuk batang langsing. Penyaluran beban oleh tiang melalui lekatan antara sisi tiang dan tanah (tahanan samping), dukungan ujung tiang (*end bearing*) dan tahanan lateral tanah ( $P_u$ ) sekitar.

Estimasi tahanan lateral tiang ( $P_u$ ) merupakan prosedur utama untuk perencanaan konstruksi dengan beban lateral yang cukup dominan, seperti jembatan, gedung tinggi, dan struktur menara. Metode konvensional berdasarkan kondisi keseimbangan resultan gaya yang bekerja pada tiang dan ketahanan tanah lateral  $P_u$  serta distribusi tekanan tanah lateral ( $P_L$ ) di sepanjang kedalaman tiang sebagai berikut, Broms 1964, Kurva  $p-y$  (Reese et al, 2014), menyederhanakan kondisi tanah sehingga distribusi  $P_L$  linear terhadap kedalaman, jika

tanah *nonhomogen*, penerapan metode konvensional sulit karena kondisi tanah yang *nonlinier*, sehingga  $P_u$  &  $P_L$  bervariasi secara *nonlinear*.

Salah satu *insitu test* yang paling sering digunakan karena mudah, cepat dan hemat biaya adalah *Cone Penetration Test* (CPT), yang memberikan profil tanah secara kontinu, mendefinisikan jenis lapisan, ketebalan, dan kepadatan dari masing-masing lapisan, tetapi karena pengukuran CPT diperoleh dari penetrasi vertikal kerucut, maka selama ini dianggap bahwa data CPT tidak mewakili beban lateral pada tiang, diinterpretasikan hanya untuk daya dukung vertikal saja, sehingga estimasi kapasitas beban lateral tiang, pelaku geoteknik harus melakukan uji *insitu* yang lain, seperti uji pembebanan di lapangan, dengan biaya yang sangat mahal.

Meskipun masih jarang disebutkan dalam literatur penggunaan data CPT untuk menganalisa perilaku defleksi beban tiang, tetapi

beberapa peneliti menyatakan bahwa ada hubungan antara resistensi kerucut qc dan tahanan lateral tanah Pu.

Salah satu metode pengembangan kurva p-y untuk pondasi tiang berdasar resistensi penetrasi kerucut qc adalah Bouafia, A. 2014.

Berdasarkan metode pengembangan tersebut, penulis menganalisa hubungan antara resistensi kerucut qc dan ketahanan lateral tiang Pu untuk menentukan beban lateral pondasi tiang pada tanah lunak di Wates, Kulon Progo DIY

## TINJAUAN PUSTAKA

Berbagai penelitian yang membahas tentang mekanisme perilaku defleksi pondasi tiang, melalui tes pembebanan tiang lateral skala kecil maupun penuh, memperlihatkan bahwa respon tiang pada beban lateral adalah masalah interaksi tiang-tanah yang sangat kompleks.

Meskipun jarang disebutkan dalam literatur penggunaan data CPT untuk menganalisa perilaku defleksi tiang, tetapi beberapa peneliti menyatakan bahwa ada hubungan antara resistensi kerucut qc dan tahanan lateral tanah Pu.

Beberapa peneliti menyatakan resistensi kerucut,qc sebagai fungsi tegangan efektif horisontal, $\sigma'_{h0}$  dan tegangan efektif vertikal, $\sigma'_{v0}$ . Nilai qc terutama tergantung *relative density*,Dr dan tegangan efektif horisontal, $\sigma'_{h0}$ . (Houlsby and Hitchman 1988 ; W. Broere, 1998 ; P. K. Robertson, R., et al 1985).

Hasil dari eksperimental dari peneliti, menunjukkan korelasi antara parameter respon tiang berikut, modulus tiang,E, inersia,I, diameter,D, dengan tahanan kerucut,qc, dan tahanan lateral,Pu, seperti pada hasil penelitian (Bouafia and Merouani 1995 ; Bouafia A. 2002 ; J Lee et al. 2010 ; Aleksandar B. Vesic 2013; S. Karthigeyan, et al 2007 ; Jin-wei Huang 2011).

Pendekatan kurva p-y berdasar penetrasi kerucut,qc pada tanah berpasir, menunjukkan hubungan kurva p-y, resistensi kerucut,qc dan kekakuan tanah, modulus reaksi lateral  $E_{ti}$ , (Bouafia, A. 2009 ; Garam Kim. et al 2014 ; S.K. Suryasentana and B.M. Lehane† 2014 ; Scott J. Brandenburg, Ph.D., P.E. 2017).

Desain analisis dengan metode *subgrade reaction* yang dikembangkan menggunakan metode kurva p-y, memperlihatkan parameter kunci yang mempengaruhi yaitu modulus reaksi lateral  $E_{ti}$ , dan ketahanan tanah lateral Pu.

Korelasi fungsi p-y terhadap resistensi kerucut,qc dan tekanan lateral tanah,Pu. di validasi dengan tes pembebanan skala penuh, menunjukkan hasil yang sangat baik. (Bouafia, A. 2009 ; Bouafia, A. 2014).

## LANDASAN TEORI

### Metode Beda Hingga

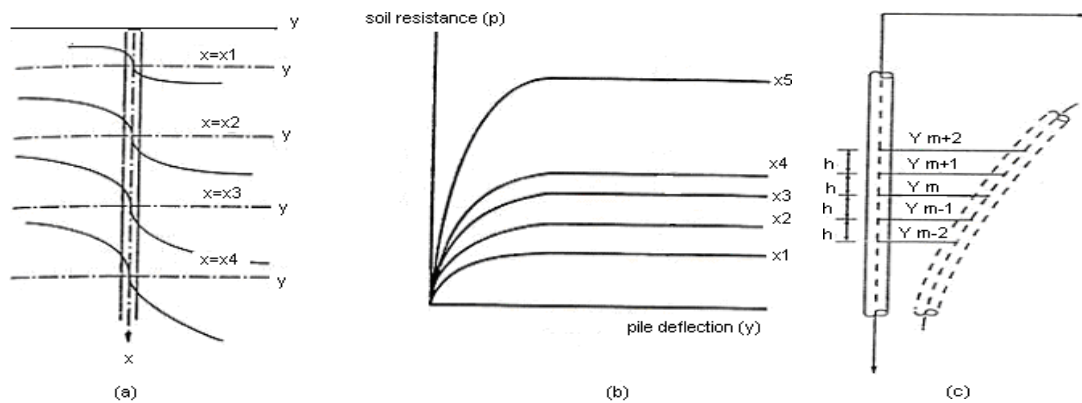
Merupakan salah satu metode penyelesaian untuk menganalisis defleksi lateral pada tiang. Metode ini mendefinisikan hubungan beban lateral dan defleksi antara tanah dan tiang yang digambarkan dalam p-y curve. Sumbu-p adalah tahanan lateral tanah persatuan panjang tiang dan sumbu-y adalah defleksi lateral tiang. Persamaan yang digunakan seperti pada Persamaan 1 berikut,

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Q \frac{d^2 y}{dx^2} - p - W = 0 \quad (1)$$

dengan :

- EI : kekakuan lentur tiang
- y : defleksi lateral di x sepanjang tiang
- Q : beban aksial pada tiang
- W : beban Lateral
- p : reaksi tanah per unit panjang = k.y

Gambaran secara numerik dari modulus tanah dapat dijelaskan pada Gambar 1 dengan kurva reaksi tanah p sebagai fungsi dari defleksi y. Secara umum, kurva-kurva tersebut adalah *nonlinear* dan bergantung pada beberapa parameter seperti kedalaman, kuat geser tanah, dan jumlah beban siklik.



**Gambar 1.** Kurva p-y dan representasi defleksi tiang (Matlock, 1970)

- (a) bentuk kurva di beberapa kedalaman, (b) kurva diplot pada sumbu-sumbu yang sama  
(c) representasi tiang yang terdefleksi

Konsep kurva p-y terlihat pada Gambar 1 mengikuti beberapa karakteristik sebagai berikut,

- Kurva p-y mewakili deformasi lateral tanah akibat beban horizontal pada tiang pada tiap kedalaman.
- Kurva p-y tidak tergantung pada bentuk dan kekakuan tiang dan tidak dipengaruhi oleh beban tanah, asumsi ini tentu tidak sepenuhnya benar, tetapi untuk keperluan praktis dapat diasumsikan bahwa defleksi tiang hanya tergantung pada reaksi tanah, oleh karena itu tanah dapat diganti dengan kurva p-y seperti pada Gambar 1.b

Kurva p-y mewakili deformasi tanah yang berubah mulai dari nol sampai dengan tegangan yang menyebabkan tanah runtuh, seperti pada Gambar 1.a. Tiang yang terdefleksi dan kurva p-y yang digambarkan pada suatu axis (Gambar 1.c dan Gambar 1.b).

#### Metode Broms (1964)

Metode sederhana berdasarkan teori tekanan tanah dengan menganggap bahwa sepanjang kedalaman tiang, tanah mencapai nilai ultimitnya sehingga dapat diterapkan pada tiang panjang dan pendek, tanah *kohesif* dan *nonkohesif*, kepala tiang terjepit dan bebas. Defleksi tiang akibat beban horizontal dapat ditentukan melalui persamaan 2 berikut,

$$y = \frac{Hu(e + zf)^3}{3EI} \quad (2)$$

dengan:

- $E$  : modulus elastisitas tiang  
 $I$  : momen inersia penampang tiang

$E$  : jarak ujung tiang ke muka tanah

Kapasitas lateral tiang pada tanah kohesif kondisi *free-end pile* (kepala tiang bebas), dapat ditentukan melalui Persamaan 3 berikut ini,

$$Hu = \frac{Mu}{(e + 1,5B + 0,5f)} \quad (3)$$

Dengan:

- $Hu$  : kapasitas lateral  
 $Mu$  : momen ultimit tiang  
 $B$  : lebar tiang  
 $Cu$  : kohesi tanah  
 $E$  : jarak dari tanah ke puncak tiang

#### Metode Kurva p-y “Bouafia”

Parameter kurva p-y yaitu modulus reaksi lateral  $E_{ti}$ , dan ketahanan tanah lateral  $P_u$  dikorelasikan dengan *cone resistance*,  $q_c$  dan karakteristik tiang, sesuai dengan Persamaan 4 berikut,

$$f(q_c^*, E_p I_p, L, B, P_u, E_{ti}) = 0 \quad (4)$$

Dengan,

- $E_p I_p$  : kekakuan lentur tiang  
 $L$  : panjang tertanam tiang  
 $B$  : diameter (tegak lurus arah beban).

Rasio pertama dicatat  $K_E$  dan disebut bilangan modulus reaksi seperti persamaan 5 berikut,

$$E_{ti} = K_E \cdot q_c^* \quad (5)$$

Rasio kedua dicatat  $K_c$  dan disebut faktor resistensi lateral seperti Persamaan 6 berikut,

$$P_u = K_c \cdot q_c^* \cdot B$$

**Tabel 1.** Nilai Koefisien a, b, n dan m (Bouafia 2014)

Soil	D/B	$K_R$	a	n	b	m
Sand	D/B <sup>3</sup> 10	$\leq 0.02$	0.1	-1.10	1.4	0.83
		$< 0.02$	7.00	0.00	0.06	0.00
Clay	D/B <sup>3</sup> 7.5	$\leq 0.03$	3.00	-0.33	7.70	1.38
		$< 0.03$	3.00	-0.33	0.06	0.00
Silt			10.80	0.00	0.10	0.00
Organic Clay			25.30	0.00	0.04	0.00

Metode kurva p-y dari data CPT dalam teori ini berdasar pada interpretasi beberapa uji pembebanan lateral skala penuh pada tanah berpasir di Perancis oleh Bouafia (2005). Kurva p-y eksperimental yang diperoleh dari tiang uji dinyatakan Persamaan 7 berikut,

$$P(z) = \frac{y(z)}{\frac{1}{E_{ti}(z)} + \frac{|Y(z)|}{P_u(z)}} \quad (7)$$

Dengan,

z : kedalaman

Pada kedalaman z tertentu, parameter kurva p-y ditentukan berdasarkan Persamaan 5 dan Persamaan 6, maka resistensi penetrasi kerucut neto,  $q_{ce}^*$  diberikan Persamaan 8 berikut,

$$q_c^*(z) = q_c(z) - \sigma_{vo}'(z) \quad (8)$$

Untuk memperhitungkan non homogenitas resistensi kerucut,  $q_c$  versus kedalaman, z dan resistensi kerucut neto setara,  $q_{ce}^*$  didefinisikan Persamaan 9 berikut,

$$q_{ce}^* = \frac{1}{De} \int_0^{De} q_c^* dz \quad (9)$$

Dengan,

De : panjang tertanam =  $\min\{\pi Lo\}$

Lo : panjang elastis, seperti Persamaan 10 berikut,

$$Lo = \sqrt[4]{\frac{E_p \cdot I_p}{K_E \cdot q_{ce}^*}} \quad (10)$$

Sedangkan rasio tiang / kekakuan lateral kemudian dapat didefinisikan sebagai Persamaan 11 berikut,

$$K_R = \frac{E_p \cdot I_p}{q_{ce}^* \cdot D^4} \quad (11)$$

Modulus reaksi  $K_E$  dan faktor hambatan lateral  $K_c$  sangat bervariasi sebagai fungsi dari kekakuan tiang/kekakuan tanah  $K_R$  sebagai Persamaan 12 dan Persamaan 13 berikut,

$$K_E = a K_R^n \quad (12)$$

$$K_c = b K_R^m \quad (13)$$

Dengan,

a, b, n dan m dapat dilihat pada Tabel 1

## METODE PENELITIAN

### Lokasi Pengujian CPT

Lokasi pengujian CPT di Wates, Kulon Progo DIY seperti Gambar 2 berikut ini,



**Gambar 2.** Denah titik Sondir dan Boring (S2&BH1 dan S4&BH3)

### Alat Uji CPT

Standar umum yang digunakan dalam penyelidikan tanah ini adalah :

ASTM D3441 – 05

*Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Tests of Soil*

SNI 2827:2008

Cara uji penetrasi lapangan dengan alat sondir

ASTM D1586 / D1586M – 18

*Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*

SNI 4153:2008

Cara uji penetrasi lapangan dengan SPT

### Prosedur Kurva p-y Bouafia

Konstruksi kurva P-Y dapat dilakukan dengan mengikuti prosedur sebagai berikut:

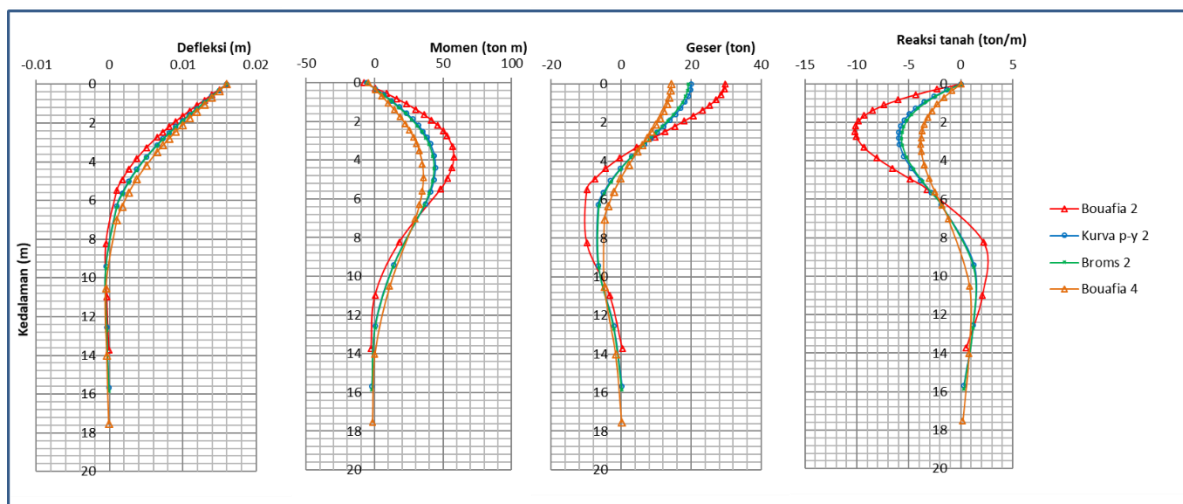
1. Data CPT bi interpolasi dengan nilai rerata
2. Kedalaman dibagi menjadi beberapa bagian yang mewakili
3. Asumsikan  $L_e=L$
4. Hitung resistensi kerucut neto setara,  $q_{ce}$  dengan Persamaan 9
5. Hitung kekakuan tiang/kekakuan tanah  $K_R$  dengan Persamaan 11
6. Hitung modulus reaksi  $K_E$  dengan Persamaan 12

7. Hitung panjang elastis  $L_0$  dengan Persamaan 10
8. Hitung modulus reaksi lateral  $E_{ti}$  dan ketahanan tanah lateral  $P_u$  dengan Persamaan 5 dan 6
9. Gambarkan kurva p-y sesuai dengan Persamaan 7

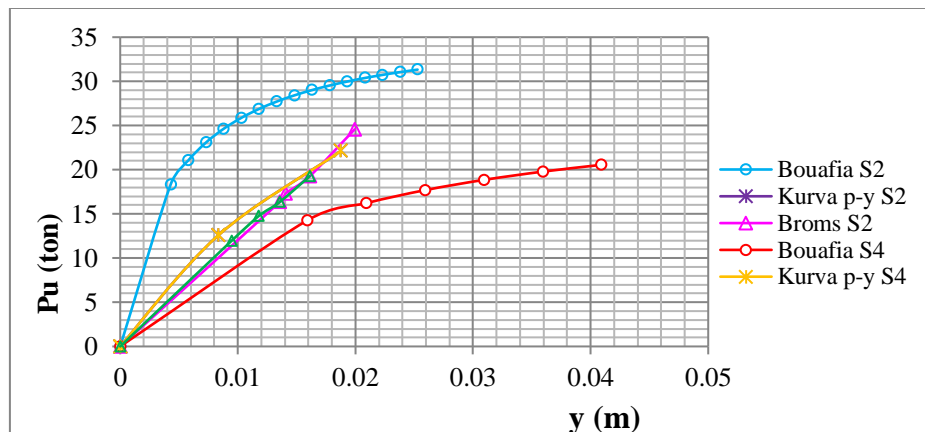
### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil Analisis

Dari titik Sondir (S2 & S4) dan Titik pengeboran (BH1 & BH3) diperoleh grafik hubungan antara Kedalaman, Defleksi, Momen, Geser dan Reaksi tanah berdasarkan teori Broms, Metode kurva p-y dan , Metode kurva p-y “Bouafia” seperti Gambar 3, dan Grafik hubungan anantara gaya lateral dan tahanan lateral seperti pada Gambar 4 berikut,



Gambar 3. Hubungan Kedalaman, Defleksi, Momen, Geser dan Reaksi tanah titik Sondir S2 dan S4



Gambar 4. Hubungan Gaya Lateral dan Tahanan Lateral Tanah

## KESIMPULAN

Dari analisis diperoleh hubungan seperti Gambar 3 dan Gambar 4 yang menunjukkan hasil sebagai berikut :

- Dengan kekakuan tiang, jenis tanah dan defleksi maksimum yang sama dibutuhkan panjang efektif tiang yang berbeda yaitu  $L_{Bouafia} \approx 17,9m$ ,  $L_{Broms} = 14,16m$  dan  $L_{p-ycurve} = 14,4m$
- Teori Broms, teori kurva p-y, menggunakan hasil laboratorium untuk menganalisa tahanan lateral tanah sehingga mendapat hasil yang tidak berbeda jauh antara satu titik dengan titik yang lain (hasil laboratorium hampir sama).
- Metode kurva p-y "Bouafia", menggunakan Hasil Test CPT (S2 lebih baik dari S4), Sehingga tahanan lateral tanah juga kelihatan berbeda yaitu  $Pu_{S2} = 34ton$  dan  $Pu_{S4} = 14,8ton$
- Teori Broms,  $L_{Broms} = 14,16m$ ;  $Pu_{Broms} = 32,4ton$ ; dan  $M_{Broms} = 19,88tonm$
- Metodekurva p-y,  $L_{p-ycurve} = 14,4m$ ;  $Pu_{p-ycurves} = 28,0ton$ ; dan  $M_{p-ycurve} = 7,50ton m$
- Metode kurva p-y "Bouafia",  $L_{Bouafia} = 17,9m$ ; dengan  $Pu_{S2bouafia} = 34ton$ ;  $Pu_{S4bouafia} = 14,8ton$ ;  $M_{S2bouafia} = 11,3tonm$ ; dan  $M_{S4bouafia} = 4,9tonm$

## DAFTAR PUSTAKA

- Aleksandar B. Vesic 2013, "Beams on Elastic Subgrade and the Winkler's Hypothesis", Proceedings of 5th International Conference of Soil Mechanics, 1963, pp. 845-850.
- Bouafia, A & Merouani, Z. (1995). *Analysis of horizontally loaded pile behaviour from cone penetration tests in centrifuge*, Proceedings of CPT'95, International Symposium on Cone Penetration testing, 4-5 october 1995, Linkoping, Sweden, Vol. 2, pp: 407-413.
- Bouafia, A. (2002), "Analysis of lateral reaction modulus for piles in sand from CPT test", Conference International Symposium on Identification and Determination of Soil and Rock Parameters for Geotechnical Design PARAM'02, At Paris
- Bouafia, A. (2009), "Analysis of P-Y Curves for Single Piles from the Cone Penetration test", Proc. 17th ICSMGE, October 2-9, 2009, Alexandria, Egypt.
- Bouafia, A. (2009), "Laterally loaded single piles - Construction of P-Y curves from the cone penetration test", Conference: 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, At Alexandria, Egypt
- Bouafia, A (2014), "P-Y curves from the CPT test for laterally loaded single piles in sand", Proc. 3rd Int. Symp. Cone Penetration testing, May 12-14 2014, Las-Vegas, Nevada, 7 p.
- Broms, B. B. (1964). "Lateral resistance of piles in cohesionless soils." *J. Soil Mech. and Found. Div.*, 90\_3\_, 123-158.
- Garam Kim, Donggyu Park, Doohyun Kyung & Junhwan Lee\* 2014, "CPT-based lateral displacement analysis using p-y method for offshore mono-piles in clays". *Geomechanics and Engineering*, Vol. 7, No. 4 (2014) 000-000
- Houlsby and Hitchman (1988), "Calibration chamber tests of a cone penetrometer in sand", *Géotechnique* ISSN 0016-8505 | E-ISSN 1751-7656 Volume 38 Issue 1, March 1988, pp. 39-44
- J Lee et al. 2010, "Estimation of Lateral Load Capacity of Rigid Short Piles in Sands Using CPT Results", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* © asce, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2010, 136(1): 48-56
- Jin-wei Huang 2011, "Development of modified p-y curves for Winkler Analysis to characterize the lateral load behavior of a single pile embedded in improved soft clay", Graduate Theses and Dissertations Iowa State University Capstones, Theses and Dissertations
- Matlock, H. *Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay*, Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1970, Paper OTC 1204
- P. K. Robertson, R. G. Campanella, P. T. Brown, I. Grof, J. M. O. Hughes (1985), "Design of axially and laterally loaded piles using *in situ* tests: A case history", *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 22, Number 4, November 1985
- Reese, Lyman C.; Van Impe, W. F. (2014), "Single piles and pile groups under lateral loading", Publisher: CRC Press, Year: 2014 ISBN: 9781439894309, 1439894302
- S. Karthigeyan1, et al 2007, "Numerical Investigation of the Effect of Vertical Load on the Lateral Response of Piles", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* © asce / may 2007, 133(5): 512-521
- Suryasentana and B.M. Lehane† 2014, "Numerical derivation of CPT-based p-y curves for piles in sand", *Géotechnique* 64, No. 3, 186-194
- Scott J. Brandenburg, Ph.D., P.E. 2017, "Determination of p-y Curves and Pile Lateral Capacity by Direct Use of CPT Data", *OC Geo-Institute Chapter*

ASTM D3441 – 05 *Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Tests of Soil*

SNI 2827:2008 Cara uji penetrasi lapangan dengan alat sondir

ASTM D1586 / D1586M – 18 *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*

SNI 4153:2008 Cara uji penetrasi lapangan dengan SPT