

ANALISA TURAP KANTILEVER PADA TANAH PASIR MENGANDUNG BELERANG

Roski R.I. Legrans

ABSTRAK

Turap (sheet pile) adalah salah jenis konstruksi yang digunakan dalam pekerjaan teknik sipil yang secara garis besar konstruksi turap dibagi menjadi 2 (dua) jenis, yakni turap kantilever (cantilever sheet pile walls) dan turap penjangkaran (anchored sheet pile walls). Untuk turap kantilever, analisisnya adalah untuk menentukan kedalaman pemancangan dan momen maksimum yang berguna untuk penentuan panjang turap yang dibutuhkan dan profil dan bahan yang akan digunakan pada turap tersebut. Dengan menggunakan komponen geser tanah pasir murni dan pasir mengandung belerang yang telah diteliti di laboratorium, dihitung kedalaman pemancangan teoritis dan momen maksimum turap dinding kantilever yang dipancang pada tanah pasir. Dari hasil perhitungan disimpulkan bahwa pasir mengandung belerang yang menambah nilai sudut geser dalam φ memberikan nilai $D_{teoritis}$ dan M_{max} masing-masing sebesar 11,17 % dan 16,04 % lebih kecil dari hasil pada pasir murni. Pada tanah pasir yang terdiri atas 2 (dua) lapisan, kondisi $\varphi_1 < \varphi_2$ memberikan nilai $D_{teoritis}$ sebesar 0,43 % lebih kecil dari hasil pada kondisi $\varphi_1 > \varphi_2$, dan kondisi $\varphi_1 > \varphi_2$ memberikan nilai M_{max} sebesar 10,5 % lebih kecil dari hasil pada kondisi $\varphi_1 < \varphi_2$.

Kata kunci : turap kantilever, pasir, belerang

1. PENDAHULUAN

Turap (*sheet pile*) adalah salah satu jenis konstruksi yang digunakan dalam pekerjaan teknik sipil. Walaupun sering difungsikan sebagai penahan tanah, akan tetapi jika dibandingkan dengan konstruksi dinding penahan tanah (*retaining wall*) memiliki perbedaan dalam jenis material pembentuk, model konstruksi maupun perhitungan untuk perencanaan. Secara garis besar konstruksi turap dibagi menjadi 2 (dua) jenis, yakni turap kantilever (*cantilever sheet pile walls*) dan turap penjangkaran (*anchored sheet pile walls*). Dalam pelaksanaannya, turap dipancang ke dalam tanah dan bagian belakang turap diberi isian timbunan (*backfill*). Pada umumnya, tanah yang digunakan sebagai *backfill* adalah tanah berbutir kasar (*granular soil*) seperti pasir.

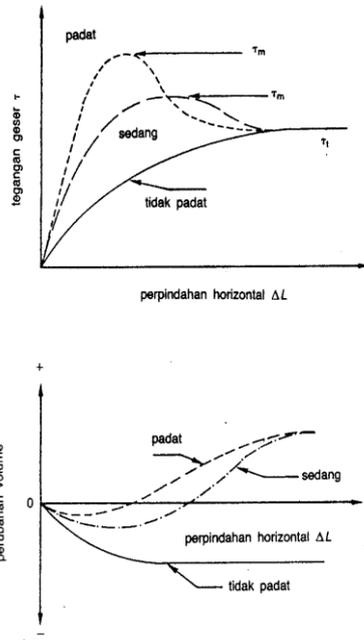
Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa pasir yang dicampur belerang bertambah kekuatannya dibandingkan dengan pasir murni (*tidak dicampur belerang*). Tulisan ini bertujuan untuk menganalisa turap kantilever yang dipancang pada tanah pasir dengan batasan masalah yakni tidak ada pengaruh muka air tanah serta pemancangan dilakukan pada tanah pasir murni dan pasir mengandung

belerang yang homogen. Dari hasil analisa akan diperoleh kedalaman pemancangan teoritis turap kantilever dan momen maksimum yang bekerja pada dinding turap.

2. PERILAKU GESER PADA PASIR

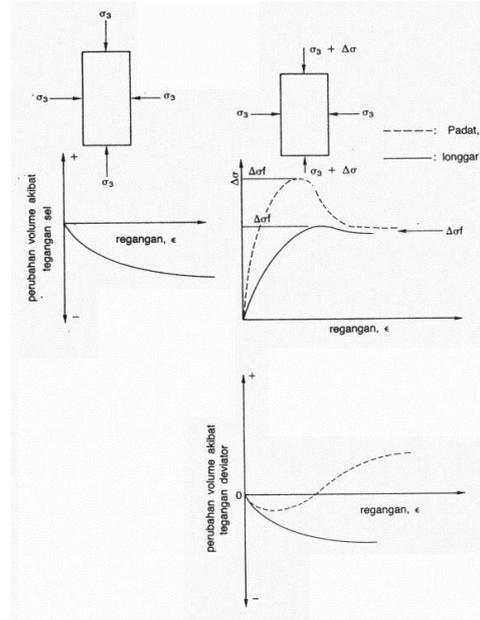
Kuat geser tanah pasir dapat ditentukan dari pengujian triaksial (*Triaxial Test*) atau pengujian geser langsung (*Direct Shear Test*). Kelebihan tekanan air pori akibat adanya beban yang bekerja di atas tanah pasir dalam kondisi jenuh adalah nol. Pada pengujian geser langsung pasir padat dan tidak padat diperoleh kesimpulan yakni : 1.) pada pengujian pasir padat, butirannya berhubungan saling mengunci satu sama lain dan rapat. Sebelum keruntuhan tercapai, hubungan antar butiran ini dapat menambah perlawanan terhadap gesekan pada bidang gesernya. Setelah tegangan puncak tercapai pada ΔL yang rendah, tingkatan penguncian antar butirannya turun dan tegangan geser selanjutnya berkurang. Pengurangan tingkat penguncian antarbutir menghasilkan pertambahan volume benda uji selama geser berlangsung. Pada kondisi ini tegangan geser menjadi konstan, yaitu pada nilai tegangan batasnya; 2.) Pada pasir yang tidak padat,

derajat penguncian antarbutiran kecil sehingga kenaikan tegangan geser secara berangsur-angsur akan menghasilkan nilai yang menuju tegangan batasnya, dengan tidak ada nilai tegangan geser pada puncaknya. Tiap kenaikan tegangan gesernya akan diikuti oleh suatu pengurangan volume benda ujinya.



Gbr 1. Hasil pengujian geser langsung pada tanah pasir

Pengujian triaksial pada tanah pasir biasanya diterapkan pada kondisi *consolidated drained*. Ini disebabkan karena air pori relatif cepat mengalir dan konsolidasi cepat terjadi pada tanah pasir (Jumikis, 1967). Perbedaan antara perubahan volume yang terjadi pada tanah pasir dan lempung adalah lamanya waktu yang dibutuhkan untuk perubahan volume. Perbedaan waktu sangat tergantung dari permeabilitas tanah. Permeabilitas tanah pasir yang tinggi menyebabkan air pori keluar akan lebih cepat sehingga perubahan volume akibat penghamburan air pori akan lebih cepat terjadi pada tanah pasir dibandingkan pada tanah lempung.

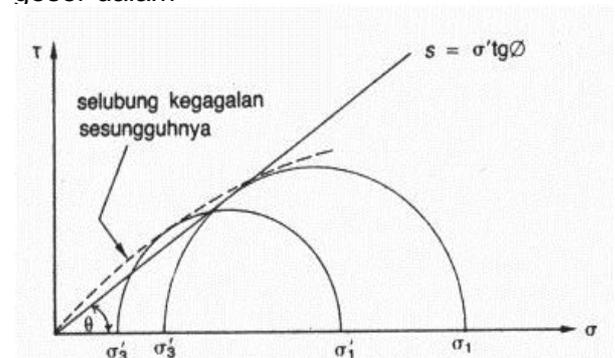


Gbr 2. Hasil pengujian triaksial pada tanah pasir

Karena pasir adalah tanah non-koheksi (*cohesionless*), maka nilai $c = 0$. Dengan demikian persamaan kuat geser untuk pasir adalah :

$$\tau_f = \sigma' \cdot \text{tg}\phi$$

Keterangan : τ_f = tegangan geser saat keruntuhan; σ' = tegangan efektif; ϕ = sudut geser dalam



Gbr 3. Lingkaran Mohr hasil pengujian triaksial pada tanah pasir

Type of sand	ϕ	
	Loose	Dense
Uniform sand, rounded particles	27°	35
Well graded sand, angular particles	33°	45
Sandy gravel	35°	50
Silty sand	$(27^\circ - 30^\circ)$	$(30^\circ - 34^\circ)$

Tabel 1. Sudut geser dalam (ϕ) untuk tanah pasir

3. SIFAT-SIFAT BELERANG

Belerang secara visual berwarna kuning dan memiliki wujud padat pada suhu ruangan dan bisa berwujud cair maupun gas pada suhu tertentu. Dalam keadaan padat belerang saling mengunci rapat seperti batuan, tapi dalam suhu ruangan partikel belerang bisa terpisah satu sama lain dan tidak berikatan lagi. Partikelnya bisa berikatan jika mengalami panas melewati titik lelehnya sehingga berubah wujud menjadi cair, setelah itu berubah wujud menjadi cair bila suhunya berangsur-angsur turun. Belerang murni tidak berasa, tidak berbau dan tidak larut dalam air. Kekasaran elemennya berkisar dari 1,5 – 2,5 pada skala Mohr, serta merupakan konduktor buruk dari listrik dan panas. Pada suhu 119^o C belerang mulai melebur dan bila terus mendapat panas belerang dapat terbakar dengan warna biru. Partikelnya terpisah dan berubah wujud menjadi gas.

Dalam tanah, belerang bercampur dengan partikel tanah sehingga keduanya menjadi komposit tapi itu lebih condong pada permukaan tanah yang bercampur dengan belerang hasil aktifitas gunung berapi. Untuk sifat mekanik belerang tergantung dari formasi belerang. Ketahanan dalam menahan berbagai kombinasi gaya bisa dikatakan sama dalam segala arah karena dalam keadaan murni mineral penyusunnya serba sama dengan ukuran butiran sama. Dalam fase padat belerang berbentuk batuan. Dalam menahan gaya-gaya pada belerang murni bergantung pada kepadatannya. Bila padat tanpa rongga maka belerang cukup kuat untuk menahan beban normal maupun beban geser, tapi jika terdapat rongga dalam belerang maka bisa sangat rapuh.

4. HASIL PENGUJIAN LABORATORIUM TERHADAP KUAT GESER PASIR MENGANDUNG BELERANG

Wuisan (2003) melakukan penelitian kuat geser pada pasir melalui pengujian geser langsung (*Direct Shear Test*) yang diambil dari 2 (*dua*) lokasi berbeda, yakni pasir Klabat dan pasir Paal II. Benda uji divariasikan dengan campuran belerang dengan kadar 0 %, 5 %, 10 %, 20 %, dan berat volume kering sebesar $\gamma_d = 1,283 \text{ gr/cm}^3$ konstan untuk tiap-tiap benda uji. Kecepatan geser yang diambil sebesar 0,5 mm/menit dan 1 mm/menit untuk setiap benda uji. Setiap beban dilakukan 3 (*tiga*) kali pengujian a, b dan c untuk benda uji yang berjumlah 144 benda uji. Hasilnya dapat dilihat pada tabel.

Kode benda uji	ϕ (°)			ϕ rata-rata
	A1na	A1nb	A1nc	
Pasir murni	36,095	43,00	43,017	40,704
Kode benda uji	A2na	A2nb	A2nc	
Pasir + 5 % belerang	40,324	48,477	40,563	43,121
Kode benda uji	A3na	A3nb	A3nc	
Pasir + 10 % belerang	45,673	48,232	42,097	45,334
Kode benda uji	A4na	A4nb	A4nc	
Pasir + 20 % belerang	37,387	33,508	47,147	39,347

Tabel 2. Hasil uji sudut geser dalam pada benda uji pasir Paal II pada Kecepatan geser 0,5 mm/menit

Kode benda uji	ϕ (°)			ϕ rata-rata
	B1na	B1nb	B1nc	
Pasir murni	47,499	50,255	52,157	49,970
Kode benda uji	B2na	B2nb	B2nc	
Pasir + 5 % belerang	42,576	46,205	48,394	45,725
Kode benda uji	B3na	B3nb	B3nc	
Pasir + 10 % belerang	50,916	46,549	51,221	49,562
Kode benda uji	B4na	B4nb	B4nc	
Pasir + 20 % belerang	44,631	47,067	52,299	47,999

Tabel 3. Hasil uji sudut geser dalam pada benda uji pasir Klabat pada Kecepatan geser 0,5 mm/menit

Kode benda uji	ϕ (°)			ϕ rata-rata
	C1na	C1nb	C1nc	
Pasir murni	42,330	49,939	45,057	45,775
Kode benda uji	C2na	C2nb	C2nc	
Pasir + 5 % belerang	53,606	43,185	43,416	46,737
Kode benda uji	C3na	C3nb	C3nc	
Pasir + 10 % belerang	43,311	39,587	38,142	40,347
Kode benda uji	C4na	C4nb	C4nc	
Pasir + 20 % belerang	42,104	49,111	38,861	43,358

Tabel 4. Hasil uji sudut geser dalam pada benda uji pasir Paal II pada Kecepatan geser 1,0 mm/menit

Kode benda uji	ϕ (°)			ϕ rata-rata
	D1na	D1nb	D1nc	
Pasir murni	50,093	54,037	38,663	47,598
Kode benda uji	D2na	D2nb	D2nc	
Pasir + 5 % belerang	54,710	49,440	49,609	51,253
Kode benda uji	D3na	D3nb	D3nc	
Pasir + 10 % belerang	48,775	41,869	43,176	44,607
Kode benda uji	D4na	D4nb	D4nc	
Pasir + 20 % belerang	45,250	45,028	45,028	45,102

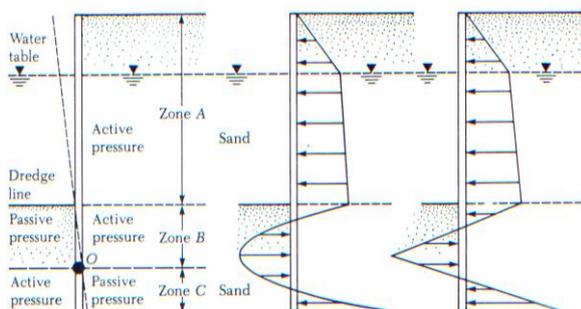
Tabel 5. Hasil uji sudut geser dalam pada benda uji pasir Klabat pada Kecepatan geser 1,0 mm/menit

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa dengan variasi tambahan kadar belerang, nilai sudut geser dalam (ϕ) naik pada penambahan sampai 5 % dari berat total campuran dan setelah itu menunjukkan kecenderungan penurunan. Nilai terendah dicapai pada titik 10 % campuran belerang. Dengan 5 % campuran belerang, nilai sudut geser dalam (ϕ) naik 0,962^o – 3,655^o walaupun pada pasir

Klabat dengan kecepatan geser 1 mm/menit menunjukkan penurunan nilai ϕ sebesar $1,971^\circ$. Dibandingkan nilai ϕ pada pasir murni, angka kenaikan itu berkisar 2,101 % - 7,68 %. Untuk kecepatan geser, semakin tinggi kecepatan geser nilai ϕ naik tapi kisarannya tidak lebih dari $1,5^\circ$, dibandingkan dengan nilai ϕ pada kecepatan geser yang lebih rendah kenaikan ini tidak lebih dari 3,4 %.

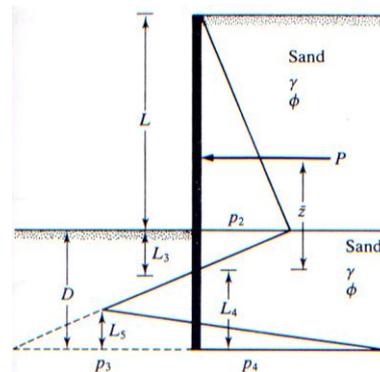
5. TURAP KANTILEVER PADA TANAH PASIR

Pemakaian turap kantilever umumnya direkomendasikan sampai pada ketinggian tanah 6 m atau kurang di atas permukaan keruk (*dredge line*). Dengan demikian turap yang berada di atas garis keruk akan berperilaku seperti balok kantilever. Gbr. 4 menunjukkan distribusi tekanan tanah yang bekerja pada sepanjang dinding turap. Zona A merupakan zona tekanan aktif, karena pada zona ini lapisan tanah yang berada di belakang dinding akan bekerja menekan dinding untuk berpindah ke depan. Adanya muka air tanah pada zona ini akan berpengaruh terhadap besarnya tekanan aktif zona A.



Gbr 4. Diagram tekanan tanah pada turap dinding kantilever

Pada zona B bekerja tekanan tanah aktif dan pasif. Tanah yang berada di bawah garis keruk akan menahan dinding agar tidak berpindah (pasif), sementara tanah yang berada di belakang dinding akan mendorong dinding ke depan (aktif). Kondisi pada zona C adalah kebalikan dari zona B, dimana terdapat titik O yang merupakan titik rotasi dinding yang membedakan zona B dan C. Apabila turap tersebut dipancang pada tanah pasir tanpa ada muka air tanah, maka diagram distribusi tekanan tanah akan menjadi seperti yang ditunjukkan oleh Gbr. 5.



Gbr 5. Diagram distribusi tekanan tanah pada turap tanpa muka air tanah

Besar tekanan p_2 dari permukaan tanah sampai dengan garis keruk adalah :

$$p_2 = \gamma \cdot L \cdot K_a$$

Keterangan : K_a = Koefisien tekanan aktif Rankine = $tg^2 (45 - \phi/2)$; γ = berat volume tanah

Pada kedalaman L_3 di bawah garis keruk tekanan p_2 akan menjadi nol, yakni :

$$L_3 = \frac{p_2}{\gamma \cdot (K_p - K_a)}$$

Keterangan : K_a = Koefisien tekanan aktif Rankine = $tg^2 (45 + \phi/2)$

Substitusi p_2 pada persamaan L_3 di atas menjadi :

$$L_3 = \frac{L \cdot K_a}{(K_p - K_a)}$$

Dengan menghitung luas diagram distribusi tekanan tanah aktif di belakang dinding turap diperoleh :

$$P = \frac{1}{2} \cdot p_2 \cdot L + \frac{1}{2} \cdot p_2 \cdot L_3$$

dan jarak \bar{z} yakni :

$$\bar{z} = \frac{L}{3} + L_3$$

Tekanan tanah pasif p_p pada bagian bawah dinding bekerja dari depan dinding menuju dinding, dan tekanan tanah aktif p_a pada bagian bawah dinding bekerja dari belakang dinding menuju dinding. Sehingga pada kedalaman $L + D$:

$$p_p = (\gamma \cdot L + \gamma \cdot D) \cdot K_p$$

dan

$$p_a = \gamma \cdot D \cdot K_a$$

Total tekanan lateral yang bekerja pada bagian bawah dinding adalah :

$$p_p - p_a = p_4 = (\gamma \cdot L + \gamma \cdot D) \cdot K_p + \gamma \cdot D \cdot K_a$$

$$p_p - p_a = p_4 = \gamma \cdot L \cdot K_p + \gamma \cdot L_3 \cdot (K_p - K_a) + \gamma \cdot L_4 \cdot (K_p - K_a)$$

$$p_p - p_a = p_4 = p_5 + p_3$$

dimana :

$$p_5 = \gamma \cdot L \cdot K_p + \gamma \cdot L_3 \cdot (K_p - K_a)$$

dan

$$p_3 = \gamma \cdot L_4 \cdot (K_p - K_a)$$

Untuk menghitung L_4 , digunakan persamaan :

$$L_4^4 + A'_1 \cdot L_4^3 - A'_2 \cdot L_4^2 - A'_3 \cdot L_4 - A'_4 = 0$$

Dimana :

$$A'_1 = \frac{p_5}{\gamma \cdot (K_p - K_a)}$$

$$A'_2 = \frac{8 \cdot P}{\gamma \cdot (K_p - K_a)}$$

$$A'_3 = \frac{6 \cdot P \cdot [2 \cdot \bar{z} \cdot \gamma \cdot (K_p - K_a) + p_5]}{\gamma^2 \cdot (K_p - K_a)^2}$$

$$A'_4 = \frac{P \cdot (6 \cdot \bar{z} \cdot p_5 + 4 \cdot P)}{\gamma^2 \cdot (K_p - K_a)^2}$$

Kedalaman teoritis $D_{teoritis}$ turap kantilever yang dipancang pada tanah pasir tanpa muka air tanah dapat dihitung dengan persamaan :

$$D_{teoritis} = L_3 + L_4$$

Kedalaman aktual turap dinding kantilever ditambah 20 % sampai 30 % nilai $D_{teoritis}$, atau $D = 1,2 \cdot D_{teoritis}$ sampai $1,3 \cdot D_{teoritis}$. Perhitungan titik geser nol z' , momen maksimum M_{max} dan modulus penampang profil S, menggunakan persamaan-persamaan :

$$z' = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{(K_p - K_a) \cdot \gamma}}$$

$$M_{max} = P \cdot (\bar{z} + z') - \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot z'^2 \cdot (K_p - K_a) \right] \left(\frac{1}{3} \right) z'$$

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{all}}$$

Keterangan : S = modulus penampang profil;

σ_{all} = tegangan lentur ijin material profil

Untuk menghitung L_4 , digunakan solusi numerik dengan metode Newton-Raphson yakni melalui terkaan nilai akar pertaman x_i dengan nilai fungsi $f(x_i)$. Persamaan Newton-Raphson adalah :

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$$

L_4 diganti dengan variabel x, dan konstanta A'_1 , A'_2 , A'_3 dan A'_4 diganti dengan b, c, d dan e, sehingga persamaan menjadi :

$$a \cdot x^4 + b \cdot x^3 - c \cdot x^2 - d \cdot x - e = 0$$

Konstanta-konstanta tersebut dihitung terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan-persamaan untuk menghitung A'_1 , A'_2 , A'_3 dan

A'_4 di atas kemudian diselesaikan dengan menggunakan metode Newton-Raphson untuk mencari nilai x.

6. APLIKASI

Data-data tanah hasil pengujian laboratorium terhadap pengujian kuat geser tanah pasir yang mengandung belerang, yakni sudut geser dalam φ dan berat volume kering γ_d , digunakan dalam aplikasi terhadap 4 (empat) kasus turap kantilever pada tanah pasir yang disajikan dalam tabel berikut :

Kasus	Lapisan 1		Lapisan 2 (di bawah garis keruk)	
	φ	γ_d	φ	γ_d
1	40,704°	1,283 t/m ³	-	-
2	43,121°	1,283 t/m ³	-	-
3	40,704°	1,283 t/m ³	43,121°	1,283 t/m ³
4	43,121°	1,283 t/m ³	40,704°	1,283 t/m ³

Dari ke-4 kasus di atas akan dihitung berapa kedalaman pemancangan teoritis $D_{teoritis}$ dan momen maksimum M_{max} apabila $L = 6$ m. Penyelesaian untuk ke-4 kasus di atas dilakukan dengan urutan langkah-langkah perhitungan yakni : 1.) hitung K_a dan K_p ; 2.) hitung p_2 ; 3.) hitung L_3 ; 4.) hitung P ; 5.) hitung z ; 6.) hitung p_5 ; 7.) hitung A'_1 , A'_2 , A'_3 , dan A'_4 ; 8.) hitung L_4 dengan menggunakan metode Newton-Raphson; 9.) hitung p_3 ; 10.) hitung p_4 ; 11.) hitung $D_{teoritis}$; 12.) hitung z' ; 13.) hitung M_{max} .

Hasil perhitungan untuk ke-4 kasus tersebut disajikan sebagai berikut :

Kasus	$D_{teoritis}$ (m)	M_{max} (tm)
1	3,5604	16,0752
2	3,1626	13,4965
3	3,3469	15,5538
4	3,3614	13,9202

7. KESIMPULAN

Dari aplikasi diperoleh hasil sebagai berikut : 1.) $D_{teoritis}$ dan M_{max} memberikan nilai terkecil pada sudut geser dalam $\varphi = 43,121^\circ$, yakni pada pasir yang mengandung belerang dibandingkan $D_{teoritis}$ dan M_{max} yang diperoleh dari pasir murni dengan sudut geser dalam $\varphi = 40,704^\circ$; 2.) Pada tanah pasir yang terdiri atas 2 (dua) lapisan dengan sudut geser dalam φ_1 dan φ_2 , $D_{teoritis}$ memberikan nilai terkecil pada kondisi $\varphi_1 < \varphi_2$ dibanding kondisi $\varphi_1 > \varphi_2$, dan M_{max} terkecil pada kondisi $\varphi_1 > \varphi_2$ dibanding kondisi $\varphi_1 < \varphi_2$.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pasir mengandung belerang yang menambah nilai sudut geser dalam φ memberikan nilai $D_{teoritis}$ dan M_{max} masing-masing sebesar 11,17 % dan 16,04 % lebih kecil dari hasil pada pasir murni. Pada tanah pasir yang terdiri atas 2 (dua) lapisan, kondisi $\varphi_1 < \varphi_2$ memberikan nilai $D_{teoritis}$ sebesar 0,43 % lebih kecil dari hasil pada kondisi $\varphi_1 > \varphi_2$, dan kondisi $\varphi_1 > \varphi_2$ memberikan nilai M_{max} sebesar 10,5 % lebih kecil dari hasil pada kondisi $\varphi_1 < \varphi_2$.

Nilai $D_{teoritis}$ dan M_{max} berhubungan dengan panjang turap dan profil turap yang akan digunakan. Semakin besar nilai $D_{teoritis}$ maka semakin panjang turap yang dibutuhkan untuk digunakan pada pemancangan, dan semakin besar nilai M_{max} , maka semakin besar profil yang akan digunakan pada turap. Pada akhirnya kedua nilai tersebut akan sangat berpengaruh pada biaya pengadaan turap. Oleh karena itu jika kekuatan geser tanah *backfill* dan tanah pada garis keruk makin besar, maka makin kecil nilai $D_{teoritis}$ dan M_{max} .

REFERENSI

- Bowles, Joseph E., 1968. *Foundation Analysis And Design*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Craig, R.F., 1992. *Soil Mechanics, Fifth Edition*. Chapman & Hall, New York.
- Das, Braja M., 1990. *Principles Of Foundation Engineering, Second Edition*. PWS Publishing Company, Boston.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981. *An Introduction To Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, New York.
- Jumikis, Alfreds D., 1967. *Introduction To Soil Mechanics*. D. Van Nostrand Company Inc., Amsterdam.
- Munir, R., 2006. *Metode Numerik, Edisi Revisi*. Penerbit Informatika, Bandung.
- Wuisan, V., 2003. *Skripsi : Pengaruh Campuran Belerang Terhadap Kuat Geser Pasir*. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UNSRAT, Manado.