

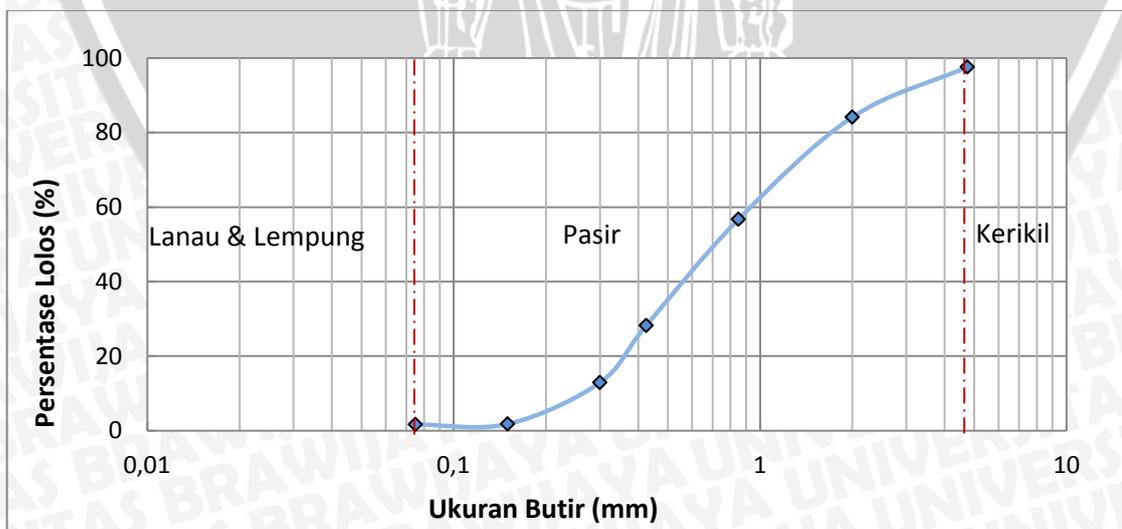
## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pengujian Material

Material yang digunakan sebagai sampel adalah tanah pasir yang berasal dari pinggiran aliran sungai Brantas Malang. Pasir yang digunakan adalah pasir berbutir halus sampai sedang yang tergolong dalam *Poorly Graded Sand* (SP) menurut sistem klasifikasi *Unified*. Pasir ini telah disaring sesuai ukuran partikel, dicuci bersih, dan dikeringkan. Sebelum digunakan dalam penelitian, terlebih dahulu dilakukan uji dasar terhadap pasir tersebut, yang meliputi analisis saringan, berat jenis (*specific gravity*), *direct shear*, kepadatan standar proctor (laboratorium) dan *sand cone (model test)*. Selain itu juga dilakukan pengujian untuk menentukan modulus elastisitas tanah dan modulus elastisitas *pile*. Sedangkan perkuatan yang digunakan adalah *pile* yang berbahan mortar dan bertulangan bambu.

#### 4.1.1 Analisis Saringan

Analisis saringan ini dimaksudkan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat kasar dan agregat halus dengan menggunakan saringan. Dari pengujian analisis saringan yang dilakukan di laboratorium diperoleh data tanah yang lolos saringan no. 200 sebesar 1,66%. Pada klasifikasi tanah sistem *Unified*, tanah tersebut digolongkan sebagai tanah berbutir kasar jenis **SP** (*Poorly Graded Sand*) dengan kurang dari 5% tanah yang lolos saringan no. 200. Data yang diperoleh disajikan dalam grafik pembagian ukuran butir pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik pembagian ukuran butir

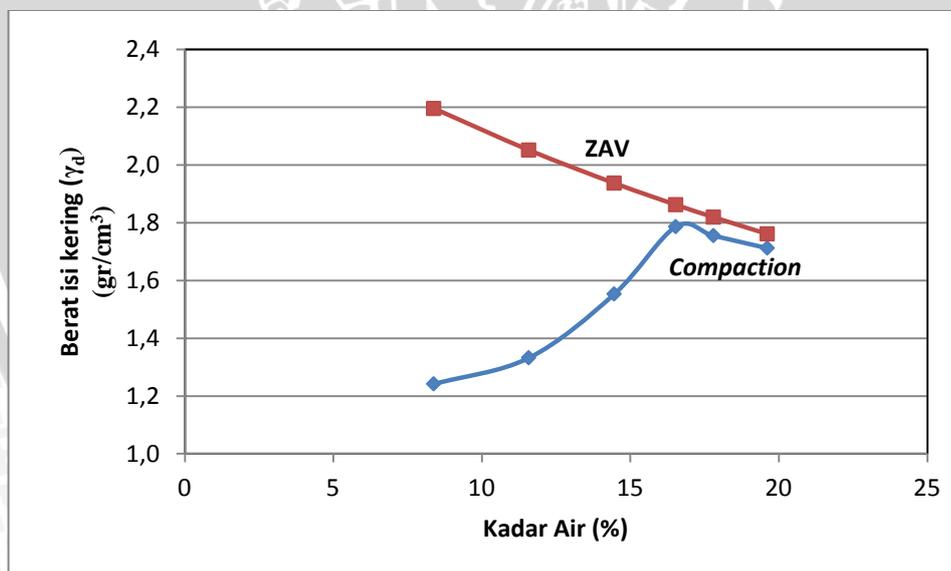


#### 4.1.2 Berat Jenis (*Specific Gravity*)

Analisis berat jenis dilakukan untuk menentukan berat jenis tanah yang mempunyai butiran lolos saringan No. 4 dengan labu ukur (*picnometer*). Berdasarkan rangkaian penelitian sebelumnya, nilai berat jenis tanah yang akan diuji dianalisis terlebih dahulu. Dari pengujian berat jenis (*specific gravity*) yang dilakukan di laboratorium diperoleh nilai berat jenis sebesar 2,689.

#### 4.1.3 Kepadatan Standar *Proctor* (Laboratorium)

Analisis kepadatan standar dimaksudkan untuk menentukan hubungan antara kadar air dan kepadatan tanah dengan memadatkan tanah di dalam *mould*. Karena tanah yang digunakan adalah tanah yang lolos ayakan No. 4 maka pemadatannya menggunakan *mould* berdiameter 102 mm (4 inci) dengan menggunakan *proctor* seberat 4,54 kg (10 lbs) dengan tinggi jatuh 45,7 cm (18 inci). Dari pengujian kepadatan standar (*compaction*) yang dilakukan di laboratorium diperoleh nilai berat isi kering maksimum ( $\gamma_{dmax}$ ) sebesar 1,781 gr/cm<sup>3</sup> dengan kadar air maksimum sebesar 17%. Dari data pengujian tersebut diperoleh grafik hubungan antara kadar air dengan berat isi kering tanah seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hubungan antara berat isi kering dan kadar air

#### 4.1.4 *Sand Cone* (Model Test)

Untuk menentukan berat isi kering pada *model test*, digunakan *Sand Cone* yang pada akhirnya juga menghasilkan nilai kepadatan relatif ( $D_r$ ). Nilai kepadatan relatif ini diperoleh dari perbandingan berat isi kering hasil pengujian *Sand Cone* tersebut dengan

berat isi kering maksimum yang diperoleh dari pemadatan standar menggunakan *proctor* (ASTM D1556-90). Berat isi kering ( $\gamma_d$ ) yang digunakan dalam penelitian ini sebesar  $1,32 \text{ gr/cm}^3$ . Dari kepadatan tersebut, diperoleh nilai kepadatan relatif ( $D_r$ ) sebesar 74%.

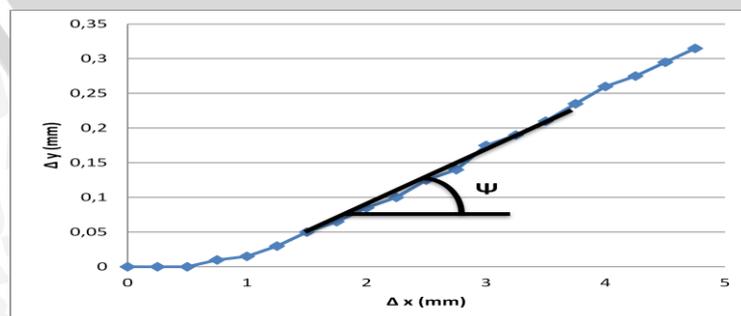
#### 4.1.5 Analisis Pengujian Geser Langsung (*Direct Shear*)

Pengujian geser langsung dilakukan untuk menentukan nilai kohesi tanah ( $c$ ), nilai sudut geser dalam tanah ( $\phi$ ), dan nilai sudut dilatasi ( $\psi$ ). Pada pengujian ini digunakan 3 benda uji yang diambil dari pasir lapis 3, 5, dan 7 dari model lereng yang telah dipadatkan. Karakteristik benda uji dapat dilihat berdasarkan grafik hubungan antara tegangan dan regangan yang terjadi tidak memiliki titik puncak. Dengan demikian dapat dikatakan benda uji yang ditunjukkan merupakan jenis tanah pasir lepas.

Untuk mendapatkan nilai kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam tanah ( $\phi$ ) harus dibentuk grafik hubungan antara tekanan normal ( $\sigma$ ) dengan tegangan geser maksimum ( $\tau$ ). Dari grafik hubungan tersebut, ketiga titik yang diperoleh dihubungkan sehingga membentuk garis lurus yang memotong sumbu vertikal pada nilai kohesi ( $c$ ) dan memotong sumbu horizontal ( $\sigma$ ) dengan sudut geser tanah ( $\phi$ ) sesuai dengan persamaan :  $\tau = \sigma \tan \phi$ .

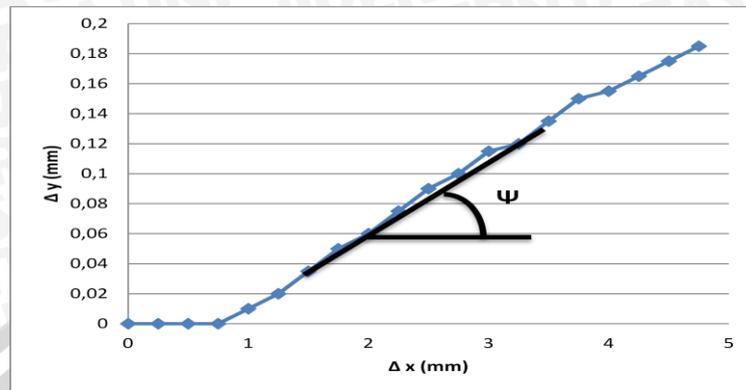
Sudut dilatasi merupakan derajat perubahan volume yang diperoleh dari grafik hubungan antara perpindahan horizontal ( $\Delta x$ ) dengan perpindahan vertikal ( $\Delta y$ ). Dari grafik hubungan tersebut, ditentukan garis yang linier. Nilai arc tangen dari perbandingan ( $\Delta y$ )/( $\Delta x$ ) pada garis linier tersebut merupakan sudut dilatasi.

Pengujian ini dilakukan dengan mengambil tiga sampel tanah dari tiga lapisan yang berbeda (lapisan 3, 5, dan 7). Sebagai contoh, hasil pengujian *direct shear* di lapisan 3, disajikan pada Gambar 4.3, Gambar 4.4, Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7.



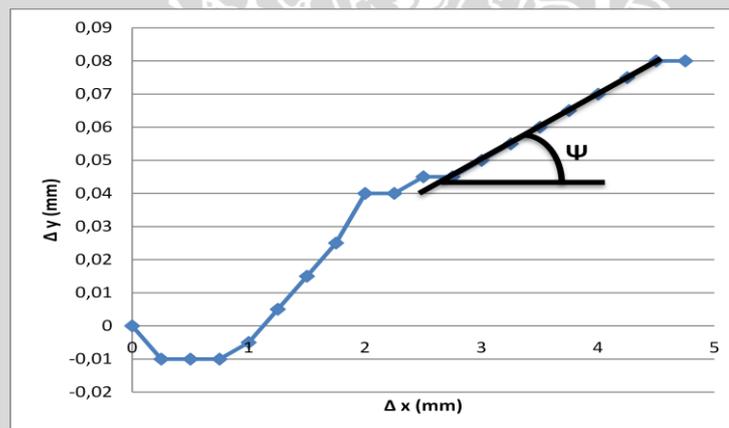
Gambar 4.3 Hubungan antara perpindahan vertikal dengan perpindahan horizontal lapisan 3 pada beban 0,4 kg

Didapatkan sudut dilatasi ( $\psi$ ) pada beban 0,4 kg sebesar  $4^\circ$ .



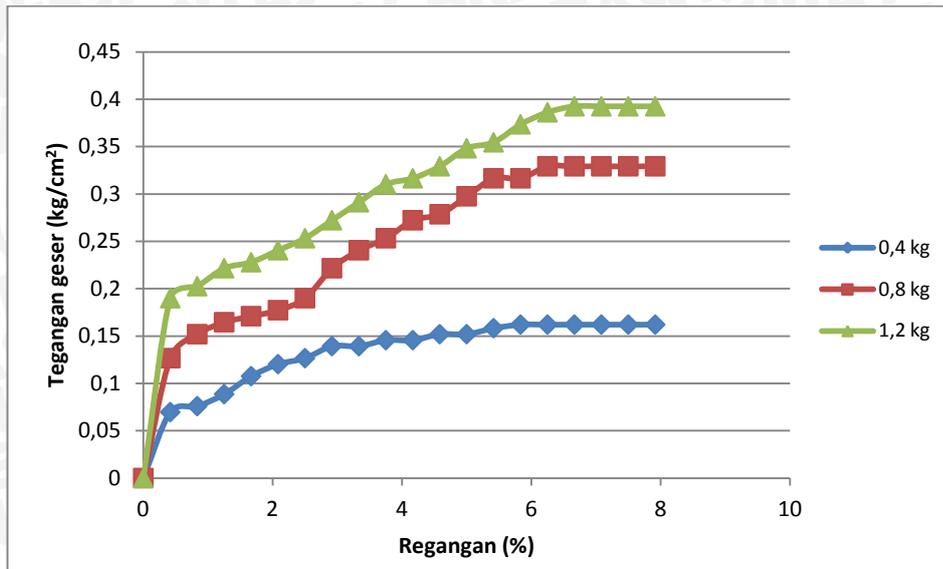
Gambar 4.4 Hubungan antara perpindahan vertikal dengan perpindahan horizontal lapisan 3 pada beban 0,8 kg

Didapatkan sudut dilatasi ( $\psi$ ) pada beban 0,8 kg sebesar  $3,43^\circ$ .

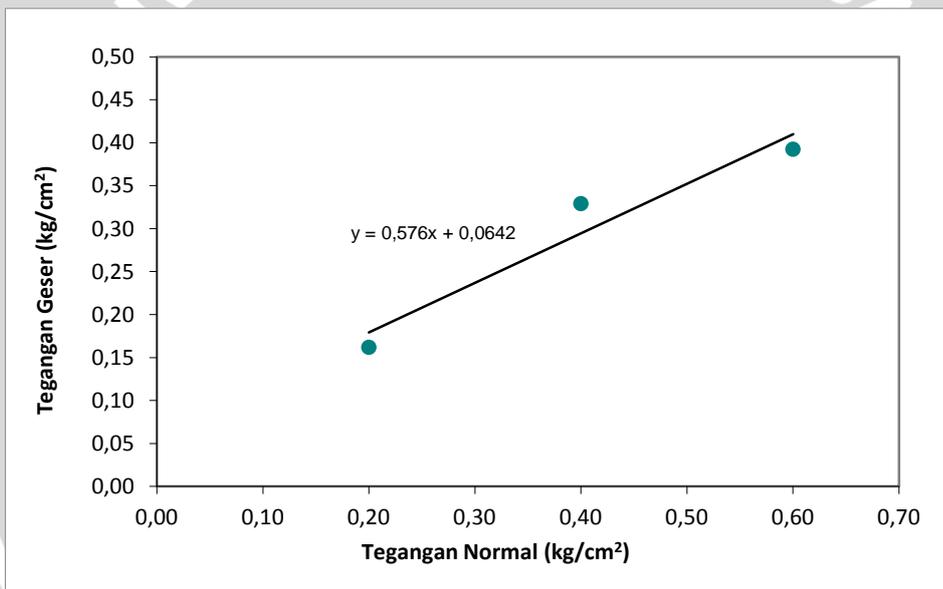


Gambar 4.5 Hubungan antara perpindahan vertikal dengan perpindahan horizontal lapisan 3 pada beban 1,2 kg

Didapatkan sudut dilatasi ( $\psi$ ) pada beban 1,2 kg sebesar  $2,29^\circ$ .



Gambar 4.6 Hubungan antara tegangan geser dengan regangan lapisan 3



Gambar 4.7 Hubungan antara tegangan geser dengan tegangan normal lapisan 3

Dari pengujian geser langsung (*direct shear*) yang dilakukan, diperoleh nilai kohesi ( $c$ ) sebesar 0,064. Karena tanah yang digunakan adalah tanah pasir, maka nilai kohesi tersebut memenuhi kriteria tanah pasir, yaitu  $c = 0$ . Untuk nilai sudut geser tanah ( $\phi$ ) didapatkan rata-ratanya adalah  $34,4^\circ$ . Sedangkan untuk sudut dilatasi ( $\psi$ ) didapatkan nilai sebesar  $3,2^\circ$ .

#### 4.1.6 Modulus Elastisitas Tanah (E) berdasarkan Uji Pembebanan

Nilai modulus elastisitas tanah (E) di lapangan berbeda dengan nilai modulus elastisitas tanah pada *model test* di laboratorium sehingga kita tidak dapat menggunakan nilai modulus elastisitas di lapangan yang tertera dalam tabel-tabel. Oleh karena itu, perlu dilakukan perhitungan tersendiri untuk memperoleh nilai modulus elastisitas tanah pada *model test* tersebut.

Modulus elastisitas tanah diperoleh dari uji pembebanan hingga mencapai beban runtuh saat pengujian di laboratorium. Hasil uji pembebanan tersebut berupa grafik hubungan antara daya dukung tanah dengan penurunan. Untuk memperoleh nilai modulus elastisitas, yaitu dengan menggunakan *secant modulus* pada grafik tersebut. Dengan *secant modulus* akan diperoleh nilai  $\frac{q_u}{s_u}$ . Nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (4.1) untuk mendapatkan nilai E.

$$E = \frac{q_u}{s_u} \cdot \frac{1}{\nu} \cdot I_w \cdot B_p \quad (4-1)$$

dengan  $\nu$  adalah Poisson ratio,  $I_w$  adalah faktor pengaruh bentuk (untuk pondasi menerus = 1), dan  $B_p$  adalah lebar pondasi. Perhitungan untuk memperoleh nilai modulus elastisitas terdapat dalam Tabel 4.1 yang diperoleh dari hasil uji pembebanan.

Tabel 4.1 Nilai-nilai modulus elastisitas tanah

No	Variabel	$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	E rata-rata (kN/m <sup>2</sup> )
1	Tanpa Pile	19,081	225,794	464,599
2	D 1,27 cm; D <sub>1</sub> 7,5 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	27,429	455,337	
3	D 1,27 cm; D <sub>1</sub> 10 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	23,851	330,356	
4	D 1,27 cm; D <sub>1</sub> 12,5 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	22,658	271,781	
5	D 1,27 cm; D <sub>1</sub> 15 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	21,466	242,507	
6	D 1,905 cm; D <sub>1</sub> 7,5 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	28,621	530,454	
7	D 1,905 cm; D <sub>1</sub> 10 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	26,236	340,461	
8	D 1,905 cm; D <sub>1</sub> 12,5 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	25,044	361,740	
9	D 1,905 cm; D <sub>1</sub> 15 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	23,851	296,914	
10	D 2,54 cm; D <sub>1</sub> 7,5 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	35,777	529,376	
11	D 2,54 cm; D <sub>1</sub> 10 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	31,006	471,323	
12	D 2,54 cm; D <sub>1</sub> 12,5 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	26,236	378,126	
13	D 2,54 cm; D <sub>1</sub> 15 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	25,044	340,195	
14	D 3,175 cm; D <sub>1</sub> 7,5 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	38,162	1113,047	
15	D 3,175 cm; D <sub>1</sub> 10 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	33,391	837,085	
16	D 3,175 cm; D <sub>1</sub> 12,5 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	29,814	671,271	
17	D 3,175 cm; D <sub>1</sub> 15 cm; h 40 cm; Lokasi Tengah Atas	26,236	502,417	

#### 4.1.7 Analisis Pengujian Elastisitas *Pile*

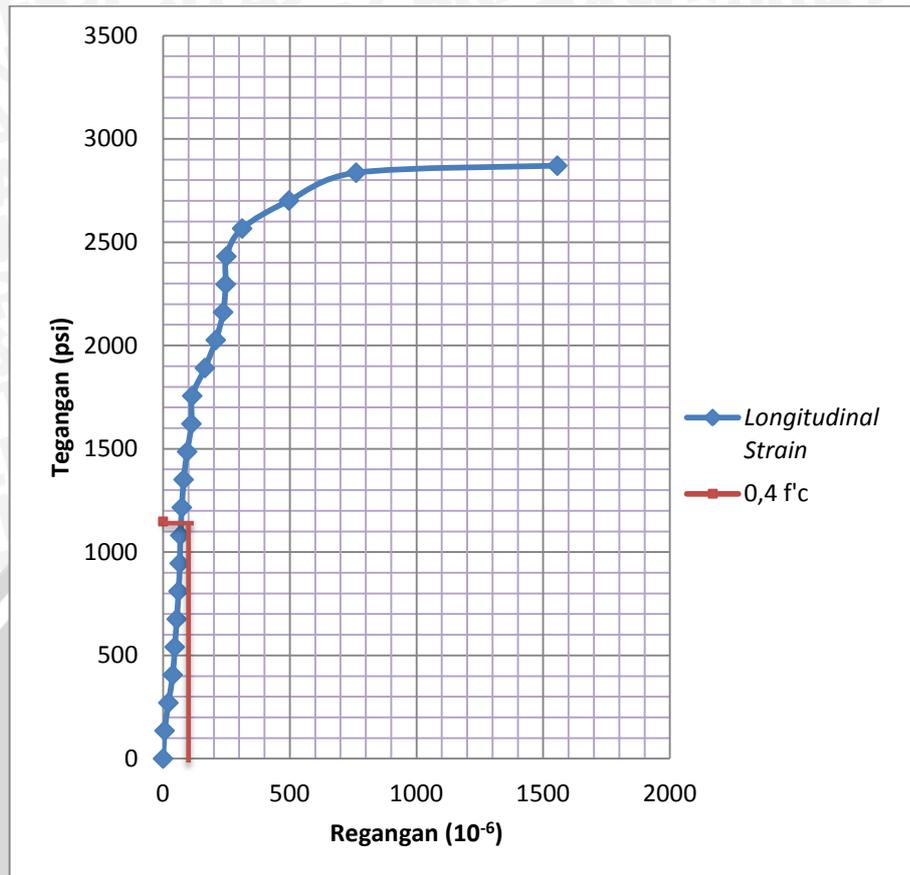
Pada penelitian ini, perkuatan yang dipakai adalah *pile* yang terbuat dari kombinasi antara mortar dengan tulangan bambu. Mortar yang digunakan merupakan campuran antara semen dan pasir dengan perbandingan 1:4. Oleh karena itu, untuk mengetahui nilai elastisitas *pile* tersebut, harus dilakukan uji elastisitas *pile* terlebih dahulu. Nilai elastisitas bahan perkuatan akan digunakan untuk mendapatkan nilai kekakuan ekuivalen dalam analisis.

Pengujian ini dilakukan dua kali menggunakan sampel dengan tinggi 16 cm dan diameter 8 cm. Adapun alat pengujian yang digunakan adalah *proving ring* dengan kapasitas 5 ton dan sebuah *strain gauge* yang dipasang pada sampel serta strainmeter untuk mengetahui besar regangan yang terjadi pada sampel. Pengujian dilakukan hingga sample mencapai beban runtuh. Pengujian elastisitas bahan *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Pengujian elastisitas bahan pada *pile*

Berdasarkan pengujian ini, didapatkan rata-rata nilai elastisitas bahan untuk *pile* sebesar 667,53 Mpa. Hubungan antara tegangan dan regangan pada sampel *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.9.

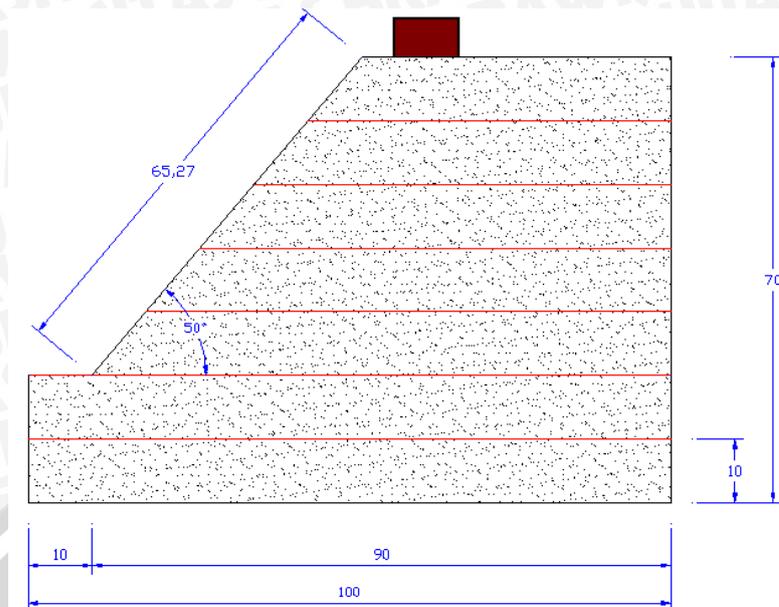


Gambar 4.9 Hubungan antara tegangan dan regangan bahan *pile*

## 4.2 Hasil Pengujian

### 4.2.1 Lereng Tanpa Perkuatan

Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan antara model lereng yang diberikan perkuatan dan model lereng tanpa perkuatan. Lereng yang dibentuk memiliki kemiringan sudut lereng sebesar  $50^{\circ}$ . Adapun bentuk lereng yang diuji dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Model lereng 2D tanpa perkuatan pada penelitian

Besarnya beban maksimum ( $Q_u$ ) yang mampu ditahan adalah sebesar  $0,191 \text{ kg/cm}^2$ . Beban maksimum ditentukan berdasarkan prosedur pembebanan yang dilakukan di laboratorium, dimana setelah beban mencapai  $0,191 \text{ kg/cm}^2$ , tidak dapat menahan beban yang lebih besar lagi di atasnya. Besarnya beban maksimum dan penurunan yang terjadi pada lereng dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Tabel beban maksimum dan penurunan lereng tanpa perkuatan

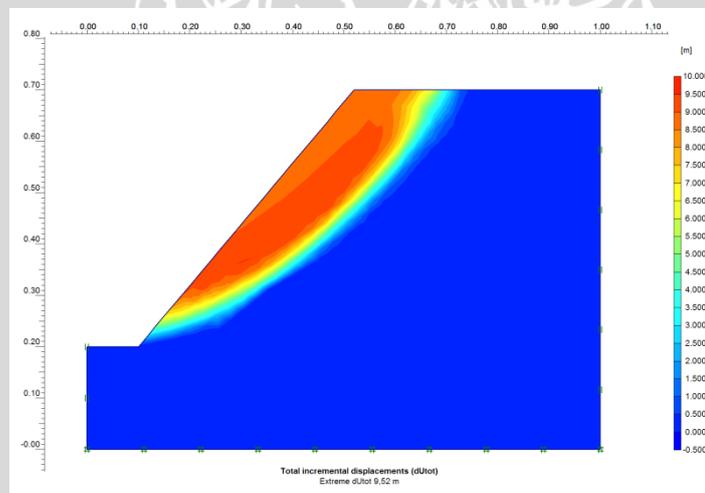
Pembacaan Proving Ring	Beban P (kg)	$Q_u$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	Penurunan tanah (mm)
0	0	0,00	0
1	23	0,02	0,81
2	46	0,05	1,775
3	69	0,07	2,875
4	92	0,10	3,845
5	115	0,12	4,97
6	138	0,14	6,075
7	161	0,17	6,91
8	184	0,19	8,53
8	184	0,19	9,75
8	184	0,19	10,465

Pola kelongsoran pada lereng dapat dilihat secara jelas dengan menggunakan program PLAXIS 8.2. Program ini dapat digunakan untuk menentukan pola kelongsoran pada lereng, karena sulit untuk mengamati pola kelongsoran yang terjadi pada lereng. Pada penelitian di laboratorium, kelongsoran lereng hanya dapat dilihat

dari besarnya perpindahan permukaan lereng yang ditunjukkan oleh pasir berwarna putih seperti yang terlihat pada Gambar 4.11. Adapun pola keruntuhan lereng tanpa perkuatan melalui program PLAXIS 8.2 dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.11 Pola keruntuhan lereng yang terjadi di laboratorium



Gambar 4.12 Pola keruntuhan lereng hasil analisis PLAXIS 8.2

## 4.2.2 Lereng dengan Perkuatan

### 4.2.2.1 Lereng dengan Perkuatan *Pile* untuk Variasi Diameter terhadap Jarak Antar *Pile*

Pada pemodelan lereng ini, digunakan perkuatan *pile* dengan variasi diameter dan jarak antar *pile*. Untuk variasi diameter *pile*, digunakan diameter *pile* sebesar 1,27 cm, 1,905 cm, 2,54 cm, dan 3,175 cm. Pada variasi diameter, digunakan rasio D/B,

dimana  $D$  merupakan diameter *pile* dan  $B$  adalah lebar pondasi yang digunakan untuk pembebanan. Besar nilai  $D/B$  untuk tiap variasi diameter dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Sedangkan untuk variasi jarak antar *pile*, digunakan jarak sebesar 7,5 cm, 10 cm, 12,5 cm, dan 15 cm. Jarak antar *pile* yang dimaksud merupakan jarak dari pusat ke pusat *pile*. Pada variasi jarak antar *pile* ini, digunakan rasio  $D_1/B$ . Dengan  $D_1$  adalah jarak antar *pile*. Besarnya rasio  $D_1/B$  untuk tiap variasi jarak antar *pile* dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.3 Nilai rasio  $D/B$  untuk setiap diameter *pile*

Diameter <i>Pile</i> (D) (cm)	Lebar Pondasi (B) (cm)	$D/B$
1,27	10	0,1270
1,905	10	0,1905
2,54	10	0,2540
3,175	10	0,3175

Tabel 4.4 Nilai rasio  $D_1/B$  untuk setiap jarak antar *pile*

Jarak Antar <i>Pile</i> (D) (cm)	Lebar Pondasi (B) (cm)	$D_1/B$
7,5	10	0,75
10	10	1,00
12,5	10	1,25
15	10	1,50

Berdasarkan hasil pengujian lereng yang telah dilakukan untuk tiap variasi diameter terhadap variasi jarak antar *pile*, didapatkan data beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) pada Tabel 4.5.

Berdasarkan data pada tabel tersebut, dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan stabilitas lereng. Hal ini ditandai dengan adanya peningkatan kemampuan lereng dalam menahan beban setelah diberi perkuatan *pile* dengan variasi diameter dan jarak antar *pile*. Hal ini membuktikan bahwa terjadi transfer beban dari tanah yang mengalami gaya akibat beban kepada *pile*.

Tabel 4.5 Beban maksimum untuk tiap variasi diameter *pile* terhadap jarak antar *pile*

D/B	D <sub>1</sub> /B	Q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
0,1270	0,75	0,274
	1,00	0,239
	1,25	0,227
	1,50	0,215
0,1905	0,75	0,286
	1,00	0,262
	1,25	0,250
	1,50	0,239
0,2540	0,75	0,358
	1,00	0,310
	1,25	0,262
	1,50	0,250
0,3175	0,75	0,382
	1,00	0,334
	1,25	0,298
	1,50	0,262

#### 4.2.2.2 Lereng dengan Perkuatan *Pile* untuk Variasi Jarak Antar terhadap Diameter *Pile*

Berdasarkan hasil pengujian lereng yang telah dilakukan untuk tiap variasi jarak antar terhadap variasi diameter *pile*, didapatkan data beban runtuh maksimum (Q<sub>u</sub>) pada Tabel 4.6.

Berdasarkan data hasil pengujian lereng dengan variasi jarak antar terhadap diameter *pile* tersebut, dapat dilihat bahwa peningkatan beban maksimum yang mampu ditahan oleh lereng bertambah seiring dengan peningkatan rasio diameter *pile* D/B dan penurunan nilai rasio jarak antar *pile* D<sub>1</sub>/B. Beban runtuh diambil berdasarkan kelongsoran yang terjadi pada lereng sehingga tidak dapat terjadi penambahan beban pada lereng. Tanda-tanda kelongsoran lereng dapat dilihat pada Gambar 4.13.

Tabel 4.6 Beban maksimum untuk tiap variasi jarak antar *pile* terhadap diameter *pile*

$D_1/B$	$D/B$	$Q_u$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
0,75	0,1270	0,274
	0,1905	0,286
	0,2540	0,358
	0,3175	0,382
1,00	0,1270	0,239
	0,1905	0,262
	0,2540	0,310
	0,3175	0,334
1,25	0,1270	0,227
	0,1905	0,250
	0,2540	0,262
	0,3175	0,298
1,50	0,1270	0,215
	0,1905	0,239
	0,2540	0,250
	0,3175	0,262



Gambar 4.13 Kondisi lereng dengan perkuatan *pile* setelah dibebani

#### 4.2.3 Pemeriksaan Berat Isi Kering Tanah dan Kadar Air

Pengujian berat isi kering dan kadar air dilakukan pada tiap lapisan sebanyak total tujuh lapisan. Hal ini dilakukan agar kepadatan tanah dan kadar air tetap terkontrol. Tujuan dari pemeriksaan ini adalah untuk mengetahui nilai kepadatan, yaitu berat isi tanah ( $\gamma_d$ ) dengan menggunakan *density ring*. Percobaan ini dilakukan pada tiap lapisan

tanah yang telah dipadatkan menggunakan *proctor* dan diambil sebanyak dua buah benda uji. Hasil dari pengujian ini digunakan untuk pemodelan lereng untuk mendapatkan nilai kepadatan tanah yang direncanakan.

Tujuan dari pemeriksaan kadar air adalah untuk mengetahui seberapa besar kadar air yang terkandung dalam tanah tersebut. Dimana kadar air adalah perbandingan antara berat air yang terkandung dalam tanah dengan berat butir tanah tersebut dalam persen. Pada penelitian ini, pengujian kadar air dilakukan pada tiap lapisan sebanyak total tujuh lapisan. Untuk pemeriksaan kadar air, hanya diambil satu buah sampel per lapisan untuk diuji.

#### 4.2.3.1 Hasil pengujian berat isi tanah dan kadar air untuk variasi diameter terhadap jarak antar *pile*

Dari pengujian yang telah dilakukan, diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 4.7 Nilai berat isi tanah dan kadar air untuk tiap variasi diameter terhadap jarak antar *pile*

D/B	D <sub>1</sub> /B	Berat isi kering tanah (gr/cm <sup>3</sup> )	Kadar Air (%)
0,1270	0,75	1,355	12,984
	1,00	1,317	12,248
	1,25	1,342	13,134
	1,50	1,311	13,013
0,1905	0,75	1,347	12,650
	1,00	1,278	12,503
	1,25	1,330	12,679
	1,50	1,373	12,903
0,2540	0,75	1,306	12,441
	1,00	1,331	12,735
	1,25	1,303	12,085
	1,50	1,296	12,033
0,3175	0,75	1,346	12,937
	1,00	1,330	12,866
	1,25	1,350	13,343
	1,50	1,348	12,850

#### 4.2.3.2 Hasil pengujian berat isi tanah dan kadar air untuk variasi jarak antar terhadap diameter *pile*

Dari pengujian yang telah dilakukan, diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 4.8 Nilai berat isi tanah dan kadar air untuk tiap variasi jarak antar terhadap diameter *pile*

$D_1/B$	D/B	Berat isi kering tanah ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Kadar Air (%)
0,75	0,1270	1,355	12,984
	0,1905	1,347	12,650
	0,2540	1,306	12,441
	0,3175	1,346	12,937
1,00	0,1270	1,317	12,248
	0,1905	1,278	12,503
	0,2540	1,331	12,735
	0,3175	1,330	12,866
1,25	0,1270	1,342	13,134
	0,1905	1,330	12,679
	0,2540	1,303	12,085
	0,3175	1,350	13,343
1,50	0,1270	1,311	13,013
	0,1905	1,373	12,903
	0,2540	1,296	12,033
	0,3175	1,348	12,850

### 4.3 Analisis Stabilitas Lereng (*Slope Stability*)

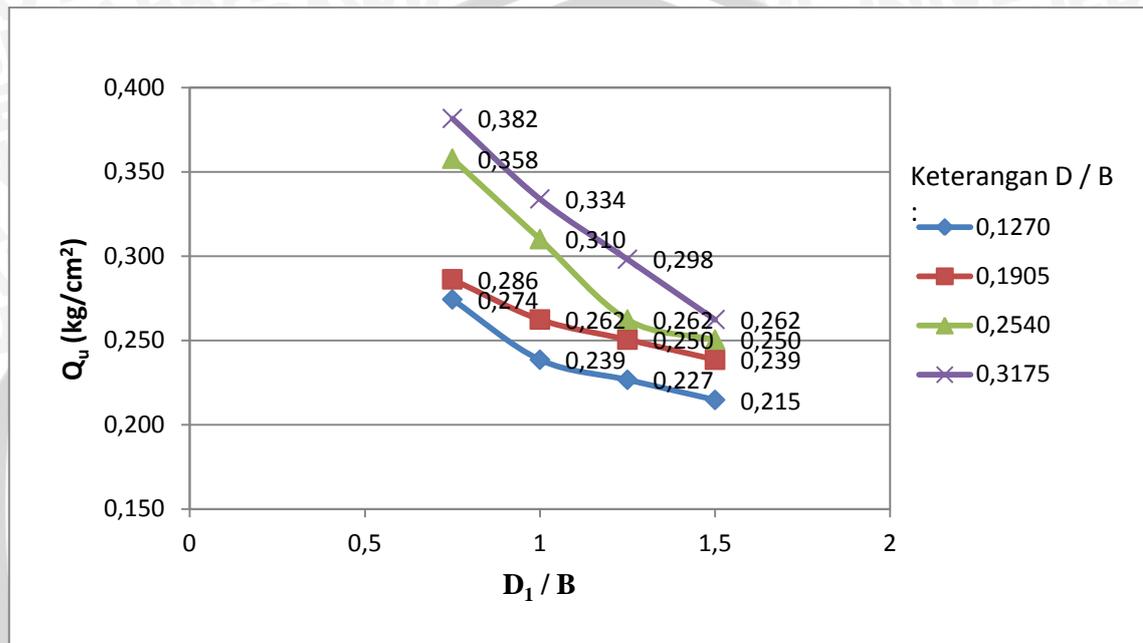
#### 4.3.1 Hubungan Antara Variasi Diameter dan Jarak Antar *Pile* terhadap Beban Runtuh Maksimum ( $Q_u$ )

Pada saat pembebanan, digunakan alat *proving ring* dengan kalibrasi sebesar 23 kg setiap satu pembacaan. Lereng diberikan tambahan beban sampai terjadi keruntuhan. Lereng dinyatakan runtuh atau telah mengalami kelongsoran apabila sudah terjadi deformasi terus menerus tanpa adanya peningkatan penambahan beban yang dibaca pada *proving ring* dengan tiga kali pembacaan beban yang sama. Beban runtuh ( $Q_u$ ) adalah beban maksimum yang dapat ditahan lereng dari *proving ring* yang bekerja tiap satuan luas pondasi yang menahan beban. Pada penelitian ini, luas beban balok kayu yang telah dihitung sebesar  $964,32 \text{ cm}^2$ .

Pengujian awal dilakukan pada lereng tanpa menggunakan perkuatan *pile*. Hasil beban runtuh pada pengujian ini, lereng mengalami keruntuhan pada nilai pembacaan *proving ring* saat jarum menunjuk angka 8, atau saat beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) sebesar  $19,1 \text{ kN}/\text{m}^2$ .

#### 4.3.1.1 Hubungan antara beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) pada variasi diameter *pile* terhadap variasi jarak antar *pile*

Berdasarkan pengujian pembebanan yang telah dilakukan, hubungan antara beban runtuh pada model lereng untuk tiap variasi diameter *pile* terhadap jarak antara *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.14.

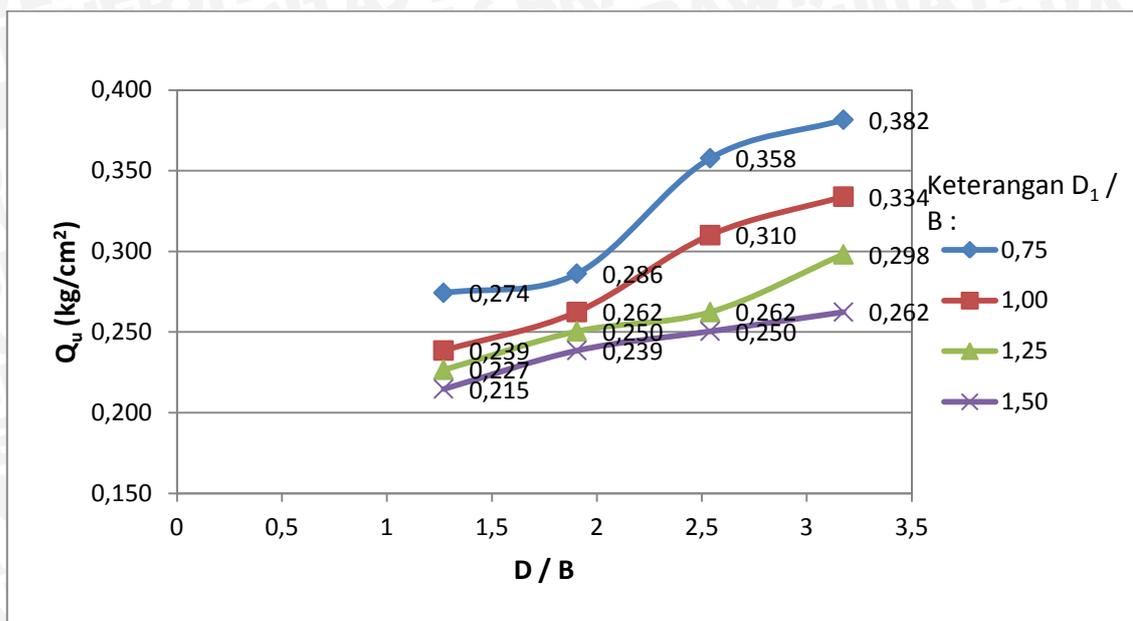


Gambar 4.14 Perbandingan nilai beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) untuk tiap variasi diameter *pile* dengan berbagai jarak antar *pile*

Pada uji pembebanan lereng diperoleh beban runtuh maksimum yang berbeda-beda pada setiap diameter *pile*. Berdasarkan grafik pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa beban runtuh maksimum terjadi saat pengujian pembebanan lereng dengan kekuatan *pile* diameter 3,175 cm ( $D/B = 0,3175$ ) dengan jarak antar *pile* 7,5 cm ( $D_1/B = 0,75$ ) yaitu sebesar 0,382 kg/cm<sup>2</sup>. Jadi dapat disimpulkan bahwa penggunaan *pile* yang optimal adalah menggunakan *pile* diameter 3,175 cm dengan jarak antar *pile* sebesar 7,5 cm.

#### 4.3.1.2 Hubungan antara beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) pada variasi jarak antar *pile* terhadap variasi diameter *pile*

Berdasarkan pengujian pembebanan yang telah dilakukan, hubungan antara beban runtuh pada model lereng untuk tiap variasi jarak antar *pile* terhadap diameter *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Perbandingan nilai beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) untuk tiap variasi jarak antar *pile* dengan berbagai diameter *pile*

Gambar 4.15 menunjukkan hubungan antara beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) dengan variasi jarak antar *pile* pada berbagai diameter *pile*. Nilai maksimum beban runtuh terletak pada jarak antar *pile* sebesar 7,5 cm dengan diameter *pile* 3,175 cm.

#### 4.3.2 Hubungan Antara *Bearing Capacity Improvement* terhadap Variasi Diameter dan Jarak Antar *Pile*

*Bearing Capacity Improvement* (BCI) adalah nilai perbandingan antara beban merata maksimum saat lereng diberi perkuatan *pile* dengan beban runtuh maksimum lereng tanpa perkuatan.

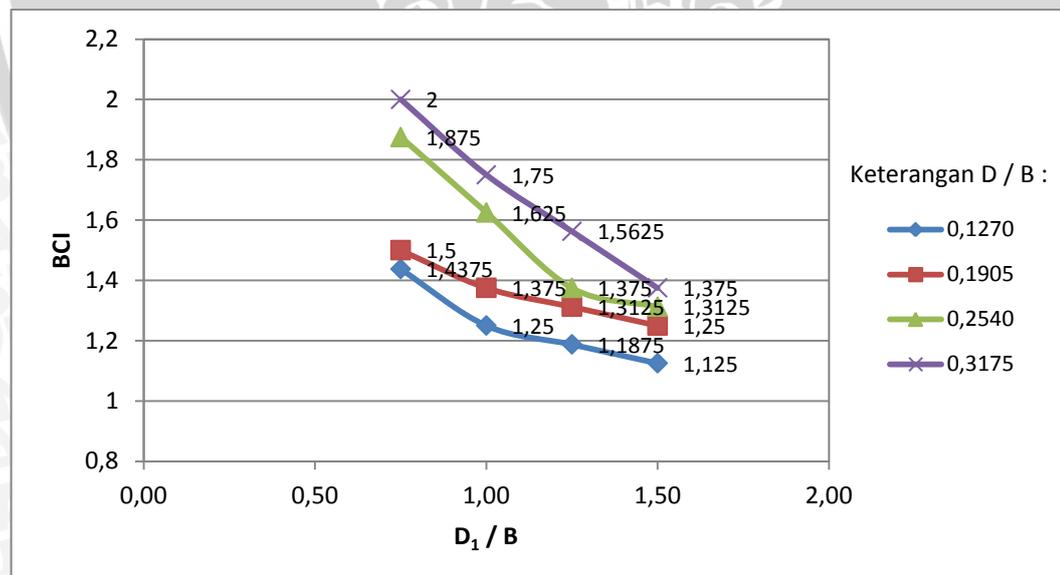
##### 4.3.2.1 Hubungan antara *bearing capacity improvement* pada variasi diameter *pile* terhadap variasi jarak antar *pile*

Berdasarkan analisis beban maksimum yang dilakukan untuk setiap variasi diameter dan jarak antar *pile*, maka didapatkan nilai *Bearing Capacity Improvement* (BCI) seperti pada Tabel 4.9.

Dengan melihat tabel nilai BCI tersebut, nilai peningkatan BCI pada tiap diameter dan jarak antar *pile* dapat dibandingkan. Grafik perbandingan BCI untuk tiap variasi perkuatan *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.16.

Tabel 4.9 Nilai BCI untuk tiap variasi diameter *pile* terhadap jarak antar *pile*

D / B	D <sub>1</sub> / B	Q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	BCI
0,1270	0	0,191	1
	0,75	0,274	1,4375
	1,00	0,239	1,25
	1,25	0,227	1,1875
	1,50	0,215	1,125
0,1905	0	0,191	1
	0,75	0,286	1,5
	1	0,262	1,375
	1,25	0,250	1,3125
	1,5	0,239	1,25
0,2540	0	0,191	1
	0,75	0,358	1,875
	1	0,310	1,625
	1,25	0,262	1,375
	1,5	0,250	1,3125
0,3175	0	0,191	1
	0,75	0,382	2
	1	0,310	1,75
	1,25	0,298	1,5625
	1,5	0,262	1,375



Gambar 4.16 Perbandingan peningkatan BCI untuk setiap variasi diameter terhadap jarak antar *pile*

Gambar 4.16 menunjukkan variasi BCI dengan berbagai variasi diameter dan jarak antar *pile* yang berbeda. Dengan melihat grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa nilai BCI terbesar terdapat pada variasi *pile* dengan diameter 3,175 cm dengan jarak antar *pile* sebesar 7,5 cm. Ketika lereng diberikan perkuatan *pile* dengan diameter 3,175 cm dan digunakan jarak antar 7,5 cm, BCI dapat meningkat hingga 2 kali lebih baik dibandingkan dengan lereng tanpa perkuatan.

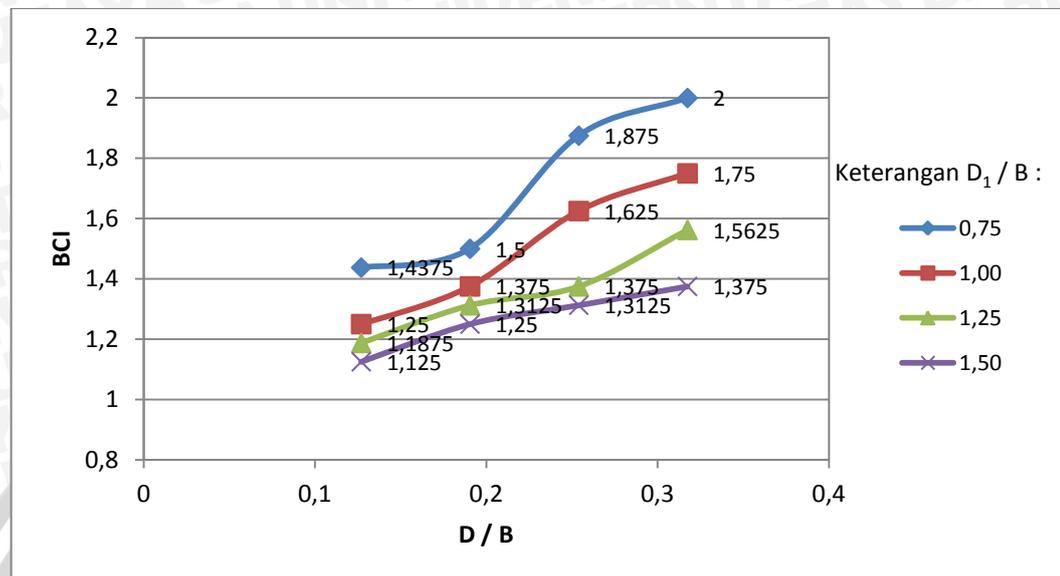
#### 4.3.2.2 Hubungan antara *bearing capacity improvement* pada variasi jarak antar *pile* terhadap variasi diameter *pile*

Berdasarkan analisis beban maksimum yang dilakukan untuk setiap variasi jarak antar dan diameter *pile*, maka didapatkan nilai *Bearing Capacity Improvement* (BCI) seperti pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Nilai BCI untuk tiap variasi jarak antar *pile* terhadap diameter *pile*

$D_1 / B$	$D / B$	$Q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	BCI
0,75	0	0,191	1
	0,1270	0,274	1,4375
	0,1905	0,286	1,5
	0,2540	0,358	1,875
	0,3175	0,382	2
1,00	0	0,191	1
	0,127	0,239	1,25
	0,1905	0,262	1,375
	0,254	0,262	1,375
	0,3175	0,310	1,75
1,25	0	0,191	1
	0,127	0,227	1,1875
	0,1905	0,250	1,3125
	0,254	0,262	1,375
	0,3175	0,298	1,5625
1,50	0	0,191	1
	0,127	0,215	1,125
	0,1905	0,239	1,25
	0,254	0,250	1,3125
	0,3175	0,262	1,375

Dengan melihat tabel nilai BCI di atas, nilai peningkatan BCI pada tiap jarak antar dan diameter *pile* dapat dibandingkan. Grafik perbandingan BCI untuk tiap variasi perkuatan *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Perbandingan peningkatan BCI untuk setiap variasi jarak antar terhadap diameter *pile*

Dengan melihat Gambar 4.17, dapat disimpulkan bahwa nilai BCI terbesar adalah pada variasi perkuatan *pile* dengan jarak antar 7,5 cm dan diameter 3,175 cm. Ketika lereng diberikan perkuatan *pile* dengan jarak antar 7,5 cm dan diameter 3,175 cm, BCI dapat meningkat hingga 2 kali lebih baik dibandingkan dengan lereng tanpa perkuatan.

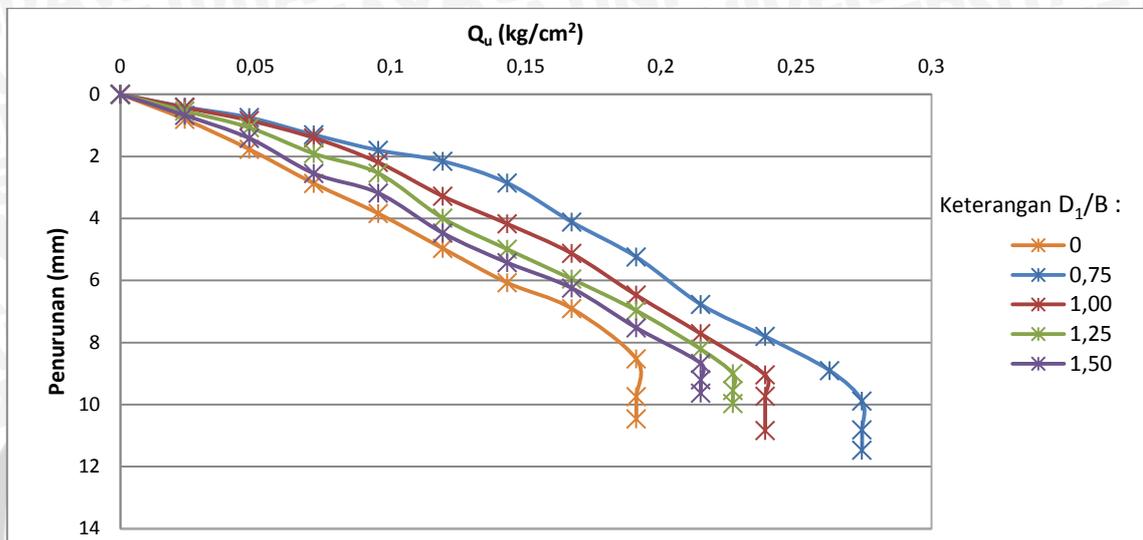
### 4.3.3 Hubungan Antara Beban Runtuh Maksimum ( $Q_u$ ) dengan Penurunan Tanah terhadap Variasi Diameter dan Jarak Antar *Pile*

#### 4.3.3.1 Hubungan antara beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) pada variasi diameter *pile* terhadap variasi jarak antar *pile*

Dari hasil percobaan, dapat diperoleh hubungan antara beban runtuh maksimum dengan penurunan tanah. Beban luar yang diterima lereng mempengaruhi besarnya penurunan (*settlement*) tanah pada dasar beban yang berbeda-beda sesuai dengan variasi diameter *pile* pada lereng. Penurunan dibaca menggunakan alat *dial gauge* dengan ketelitian 0,001 mm yang dipasang pada sebelah kiri dan kanan pondasi pada saat pembebanan diberikan secara bertahap dengan penambahan beban tiap 23 kg pada lereng.

### a. Diameter 1,27 cm

Berdasarkan pengujian pembebanan di laboratorium, nilai penurunan tanah dapat dibaca dengan menggunakan *dial gauge* yang dipasang di atas pondasi beban. Hasil pembacaan penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.18.

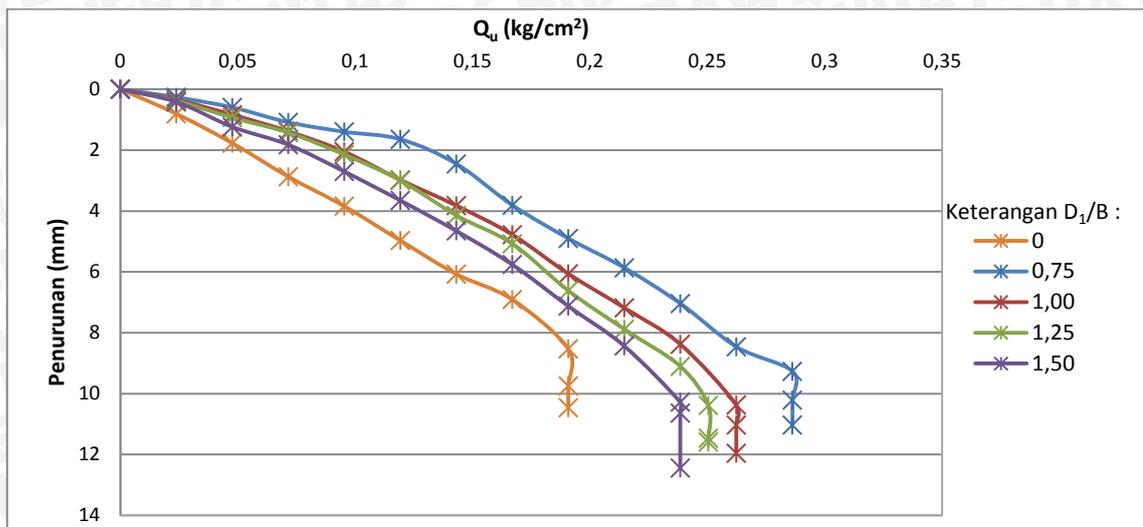


Gambar 4.18 Perbandingan nilai beban maksimum ( $Q_u$ ) dengan penurunan tanah untuk tiap variasi jarak antar *pile* terhadap diameter *pile* 1,27 cm

Untuk lereng tanpa perkuatan *pile*, penurunan tanah pada beban runtuh maksimum sebesar 0,853 cm. Sedangkan untuk lereng dengan perkuatan *pile*, penurunan tanah semakin besar berbanding lurus dengan beban runtuh ( $Q_u$ ) yang mampu ditahan oleh tiap variasi perkuatan. Untuk *pile* dengan diameter 1,27 cm, jarak antar *pile* 7,5 cm mengalami penurunan tanah sebesar 0,989 cm, jarak antar 10 cm penurunannya sebesar 0,904 cm, jarak 12,5 cm penurunannya sebesar 0,900 cm, dan pada jarak antar 15 cm penurunannya sebesar 0,867 cm. Dari grafik, dapat diketahui bahwa jarak antar *pile* maksimum untuk *pile* diameter 1,27 cm adalah 7,5 cm.

### b. Diameter 1,905 cm

Berdasarkan pengujian pembebanan di laboratorium, nilai penurunan tanah dapat dibaca dengan menggunakan *dial gauge* yang dipasang di atas pondasi beban. Hasil pembacaan penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.19.

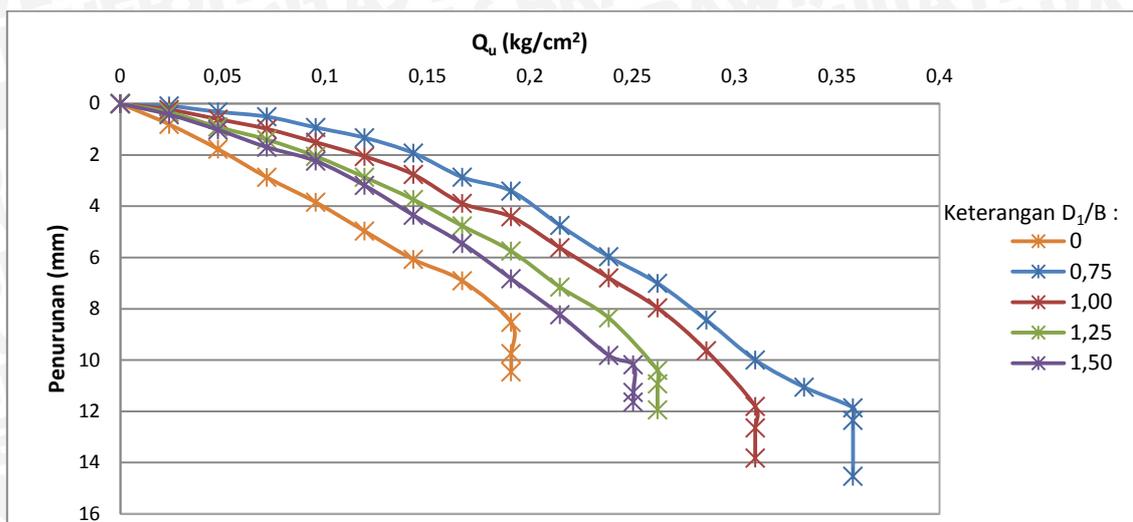


Gambar 4.19 Perbandingan nilai beban maksimum ( $Q_u$ ) dengan penurunan tanah untuk tiap variasi jarak antar *pile* terhadap diameter *pile* 1,905 cm

Untuk lereng tanpa perkuatan *pile*, penurunan tanah pada beban runtuh maksimum sebesar 0,853 cm. Sedangkan untuk lereng dengan perkuatan *pile*, penurunan tanah semakin besar berbanding lurus dengan beban runtuh ( $Q_u$ ) yang mampu ditahan oleh tiap variasi perkuatan. Untuk *pile* dengan diameter 1,905 cm, jarak antar *pile* 7,5 cm mengalami penurunan tanah sebesar 0,927 cm, jarak antar 10 cm penurunannya sebesar 1,037 cm, jarak 12,5 cm penurunannya sebesar 1,039 cm, dan pada jarak antar 15 cm penurunannya sebesar 1,028 cm. Dari grafik, dapat diketahui bahwa jarak antar *pile* maksimum untuk *pile* diameter 1,905 cm adalah 7,5 cm, karena memiliki beban runtuh yang besar dengan penurunan yang rendah.

### c. Diameter 2,54 cm

Berdasarkan pengujian pembebanan di laboratorium, nilai penurunan tanah dapat dibaca dengan menggunakan *dial gauge* yang dipasang di atas pondasi beban. Hasil pembacaan penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.20.

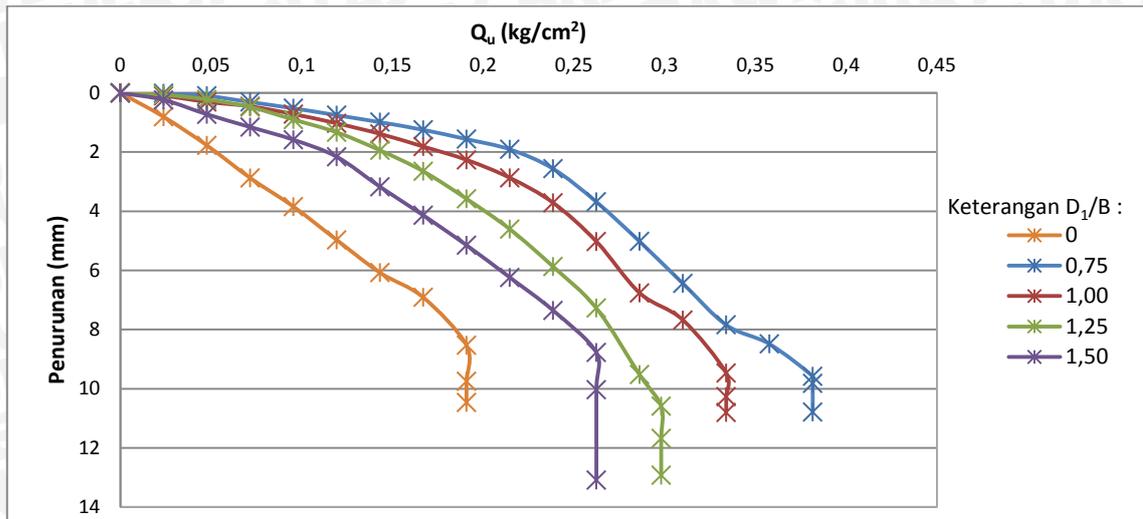


Gambar 4.20 Perbandingan nilai beban maksimum ( $Q_u$ ) dengan penurunan tanah untuk tiap variasi jarak antar *pile* terhadap diameter *pile* 2,54 cm

Untuk lereng tanpa perkuatan *pile*, penurunan tanah pada beban runtuh maksimum sebesar 0,853 cm. Sedangkan untuk lereng dengan perkuatan *pile*, penurunan tanah semakin besar berbanding lurus dengan beban runtuh ( $Q_u$ ) yang mampu ditahan oleh tiap variasi perkuatan. Untuk *pile* dengan diameter 2,54 cm, jarak antar *pile* 7,5 cm mengalami penurunan tanah sebesar 1,186 cm, jarak antar 10 cm penurunannya sebesar 1,181 cm, jarak 12,5 cm penurunannya sebesar 1,040 cm, dan pada jarak antar 15 cm penurunannya sebesar 1,018 cm. Dari grafik, dapat diketahui bahwa jarak antar *pile* maksimum untuk *pile* diameter 2,54 cm adalah 7,5 cm.

#### d. Diameter 3,175 cm

Berdasarkan pengujian pembebanan di laboratorium, nilai penurunan tanah dapat dibaca dengan menggunakan *dial gauge* yang dipasang di atas pondasi beban. Hasil pembacaan penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Perbandingan nilai beban maksimum ( $Q_u$ ) dengan penurunan tanah untuk tiap variasi jarak antar *pile* terhadap diameter *pile* 3,175 cm

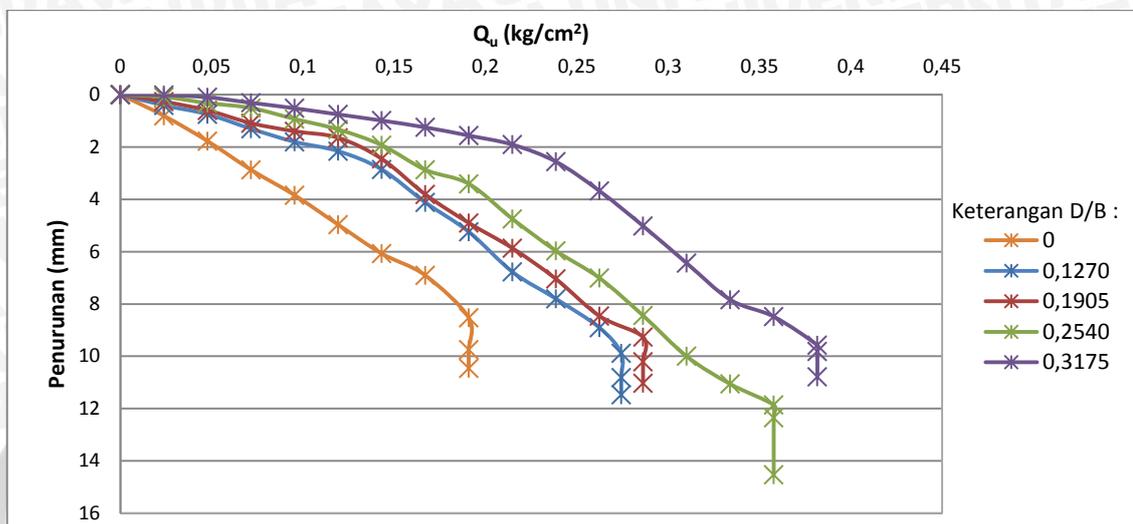
Untuk lereng tanpa perkuatan *pile*, penurunan tanah pada beban runtuh maksimum sebesar 0,853 cm. Sedangkan untuk lereng dengan perkuatan *pile*, penurunan tanah semakin besar berbanding lurus dengan beban runtuh ( $Q_u$ ) yang mampu ditahan oleh tiap variasi perkuatan. Untuk *pile* dengan diameter 3,175 cm, jarak antar *pile* 7,5 cm mengalami penurunan tanah sebesar 0,958 cm, jarak antar 10 cm penurunannya sebesar 0,947 cm, jarak 12,5 cm penurunannya sebesar 1,059 cm, dan pada jarak antar 15 cm penurunannya sebesar 0,878 cm. Dari grafik, dapat diketahui bahwa jarak antar *pile* maksimum untuk *pile* diameter 3,175 cm adalah 7,5 cm.

#### 4.3.3.2 Hubungan antara beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) pada variasi jarak antar *pile* terhadap variasi diameter *pile*

Dari hasil percobaan, dapat diperoleh hubungan antara beban runtuh maksimum dengan penurunan tanah. Beban luar yang diterima lereng mempengaruhi besarnya penurunan (*settlement*) tanah pada dasar beban yang berbeda-beda sesuai dengan variasi diameter *pile* pada lereng. Penurunan dibaca menggunakan alat *dial gauge* dengan ketelitian 0,001 mm yang dipasang pada sebelah kiri dan kanan pondasi pada saat pembebanan diberikan secara bertahap dengan penambahan beban tiap 23 kg pada lereng.

### a. Jarak antar 7,5 cm

Berdasarkan pengujian pembebanan di laboratorium, nilai penurunan tanah dapat dibaca dengan menggunakan *dial gauge* yang dipasang di atas pondasi beban. Hasil pembacaan penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.22.

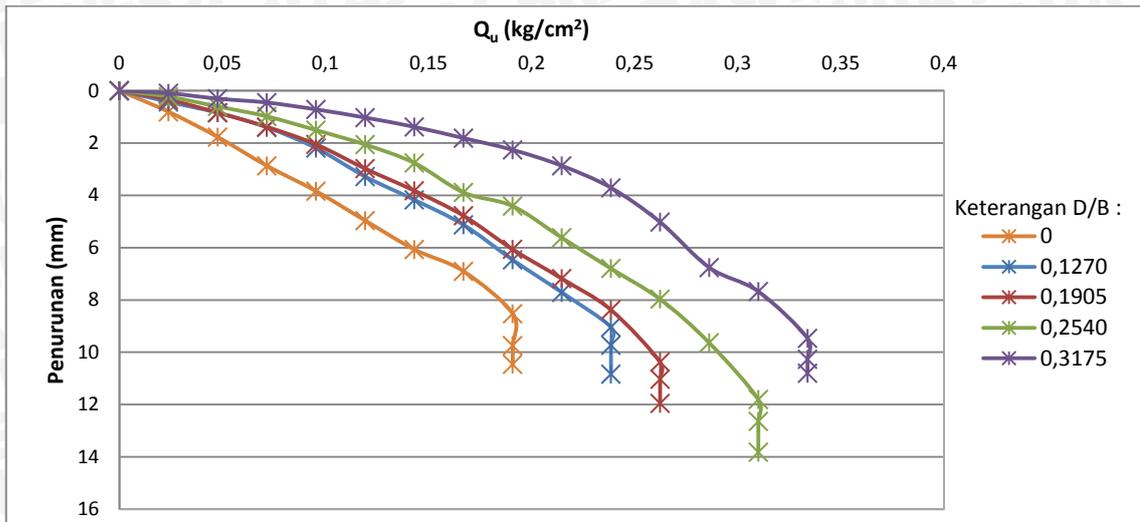


Gambar 4.22 Perbandingan nilai beban maksimum ( $Q_u$ ) dengan penurunan tanah untuk tiap variasi diameter *pile* terhadap jarak antar *pile* 7,5 cm

Untuk lereng tanpa perkuatan *pile*, penurunan tanah pada beban runtuh maksimum sebesar 0,853 cm. Sedangkan untuk lereng dengan perkuatan *pile*, penurunan tanah semakin besar berbanding lurus dengan beban runtuh ( $Q_u$ ) yang mampu ditahan oleh tiap variasi perkuatan. Untuk *pile* dengan jarak antar 7,5 cm, diameter *pile* 1,27 cm mengalami penurunan tanah sebesar 0,989 cm, diameter 1,905 cm penurunannya sebesar 0,927 cm, diameter 2,54 cm penurunannya sebesar 1,186 cm, dan pada diameter 3,175 cm penurunannya sebesar 0,958 cm. Dari grafik, dapat diketahui bahwa diameter *pile* maksimum untuk jarak antar *pile* 7,5 cm adalah 3,175 cm, karena memiliki beban runtuh yang besar dengan penurunan yang rendah.

### b. Jarak antar 10 cm

Berdasarkan pengujian pembebanan di laboratorium, nilai penurunan tanah dapat dibaca dengan menggunakan *dial gauge* yang dipasang di atas pondasi beban. Hasil pembacaan penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.23.

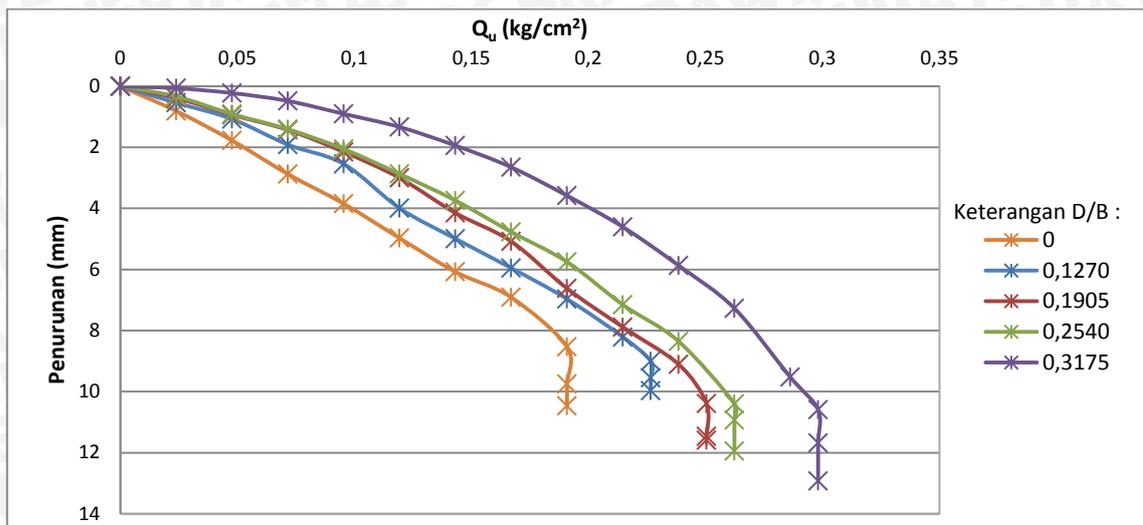


Gambar 4.23 Perbandingan nilai beban maksimum ( $Q_u$ ) dengan penurunan tanah untuk tiap variasi diameter *pile* terhadap jarak antar *pile* 10 cm

Untuk lereng tanpa perkuatan *pile*, penurunan tanah pada beban runtuh maksimum sebesar 0,853 cm. Sedangkan untuk lereng dengan perkuatan *pile*, penurunan tanah semakin besar berbanding lurus dengan beban runtuh ( $Q_u$ ) yang mampu ditahan oleh tiap variasi perkuatan. Untuk *pile* dengan jarak antar 10 cm, diameter *pile* 1,27 cm mengalami penurunan tanah sebesar 0,904 cm, diameter 1,905 cm penurunannya sebesar 1,038 cm, diameter 2,54 cm penurunannya sebesar 1,181 cm, dan pada diameter 3,175 cm penurunannya sebesar 0,947 cm. Dari grafik, dapat diketahui bahwa diameter *pile* maksimum untuk jarak antar *pile* 7,5 cm adalah 3,175 cm, karena memiliki beban runtuh yang besar dengan penurunan yang rendah.

**c. Jarak antar 12,5 cm**

Berdasarkan pengujian pembebanan di laboratorium, nilai penurunan tanah dapat dibaca dengan menggunakan *dial gauge* yang dipasang di atas pondasi beban. Hasil pembacaan penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.24.

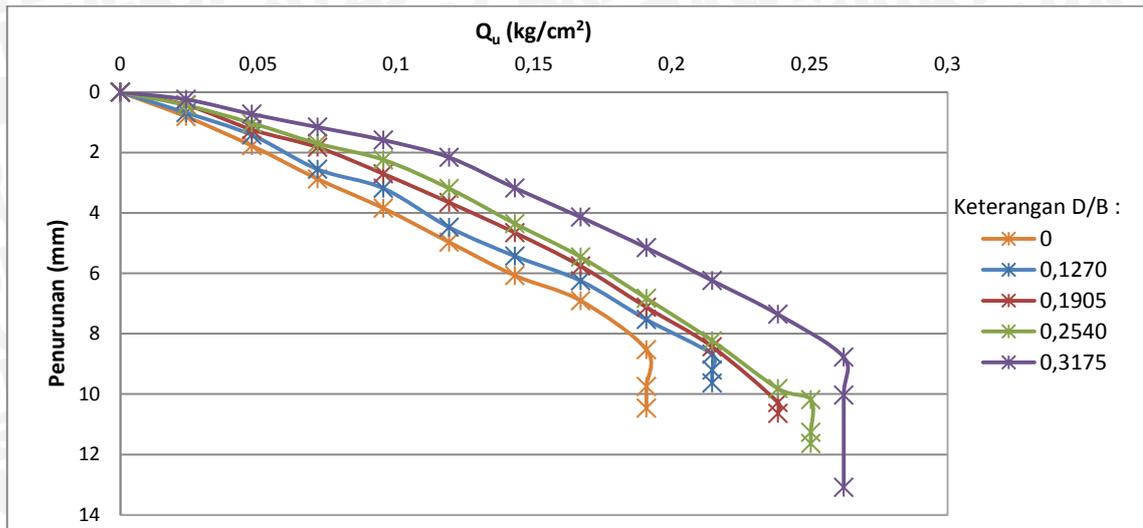


Gambar 4.24 Perbandingan nilai beban maksimum ( $Q_u$ ) dengan penurunan tanah untuk tiap variasi diameter *pile* terhadap jarak antar *pile* 12,5 cm

Untuk lereng tanpa perkuatan *pile*, penurunan tanah pada beban runtuh maksimum sebesar 0,853 cm. Sedangkan untuk lereng dengan perkuatan *pile*, penurunan tanah semakin besar berbanding lurus dengan beban runtuh ( $Q_u$ ) yang mampu ditahan oleh tiap variasi perkuatan. Untuk *pile* dengan jarak antar 12,5 cm, diameter *pile* 1,27 cm mengalami penurunan tanah sebesar 0,900 cm, diameter 1,905 cm penurunannya sebesar 1,039 cm, diameter 2,54 cm penurunannya sebesar 1,040 cm, dan pada diameter 3,175 cm penurunannya sebesar 1,059 cm. Dari grafik, dapat diketahui bahwa diameter *pile* maksimum untuk jarak antar *pile* 7,5 cm adalah 3,175 cm, karena memiliki beban runtuh yang besar dengan penurunan yang hampir sama dengan diameter *pile* lainnya.

#### d. Jarak antar 15 cm

Berdasarkan pengujian pembebanan di laboratorium, nilai penurunan tanah dapat dibaca dengan menggunakan *dial gauge* yang dipasang di atas pondasi beban. Hasil pembacaan penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.25.

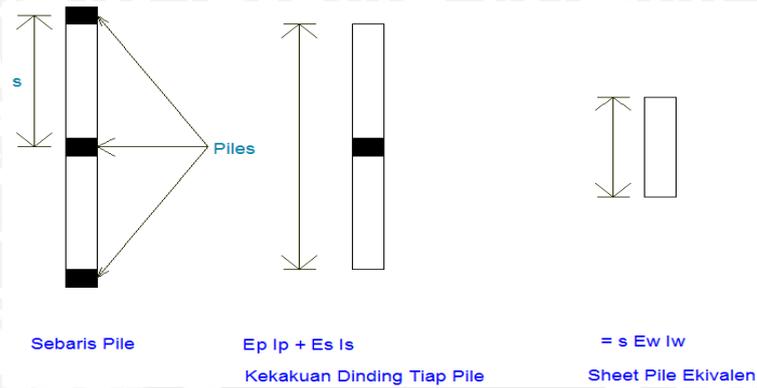


Gambar 4.25 Perbandingan nilai beban maksimum ( $Q_u$ ) dengan penurunan tanah untuk tiap variasi diameter *pile* terhadap jarak antar *pile* 15 cm

Untuk lereng tanpa perkuatan *pile*, penurunan tanah pada beban runtuh maksimum sebesar 0,853 cm. Sedangkan untuk lereng dengan perkuatan *pile*, penurunan tanah semakin besar berbanding lurus dengan beban runtuh ( $Q_u$ ) yang mampu ditahan oleh tiap variasi perkuatan. Untuk *pile* dengan jarak antar 15 cm, diameter *pile* 1,27 cm mengalami penurunan tanah sebesar 0,868 cm, diameter 1,905 cm penurunannya sebesar 1,028 cm, diameter 2,54 cm penurunannya sebesar 1,018 cm, dan pada diameter 3,175 cm penurunannya sebesar 0,878 cm. Dari grafik, dapat diketahui bahwa diameter *pile* maksimum untuk jarak antar *pile* 7,5 cm adalah 3,175 cm, karena memiliki beban runtuh yang besar dengan penurunan yang rendah dibandingkan dengan diameter *pile* lainnya.

#### 4.3.4 Nilai Transformasi EA dan EI Tanah pada Perhitungan PLAXIS 8.2 untuk Kondisi 2D

Untuk menghitung stabilitas lereng, penelitian ini menggunakan FEM (*Finite Element Method*). Dalam penelitian ini, pengujian tentang barisan *pile* dan sistem interaksi lereng disajikan dengan program PLAXIS yang menggunakan metode elemen hingga. Yang digunakan dalam perhitungan adalah PLAXIS 2D, sehingga untuk mengetahui pengaruh jarak dan diameter *pile* tidak bisa secara langsung dimasukkan ke dalam material *pile*. Nilai jarak dan diameter *pile* dihitung berdasarkan transformasi nilai EI dan EA baik *pile* maupun tanah ke dalam bentuk EI ekuivalen terlebih dahulu seperti Gambar 4.26.

Gambar 4.26 Ekuivalensi nilai EI *pile* dan tanah

Untuk mentransformasikan nilai EA dan EI, maka digunakan persamaan berikut :

$$I_{eq} = 1/12 \cdot D \cdot s^3 \quad (4-2)$$

$$EI_{eq} = (EI_{tanah} + EI_{pile}) / s \quad (4-3)$$

dimana  $s$  adalah jarak pusat ke pusat *pile* dan  $D$  adalah diameter *pile*. Pada penelitian ini, nilai  $E$  tanah diambil sebesar  $464,599 \text{ kN/m}^2$  dan  $E$  *pile* sebesar  $66752933,109 \text{ kN/m}^2$  berdasarkan hasil uji elastisitas *pile*. Nilai EA dan EI ekuivalen dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Perhitungan EI dan EA ekuivalen

Diameter (cm)	Jarak antar (cm)	$I_{tanah} \text{ (m}^4\text{)}$	$EI_{tanah}$	$I_{pile} \text{ (m}^4\text{)}$	$EI_{pile}$	$EI_{eq}$	$EA_{eq}$
1,27	7,5	$7,57 \cdot 10^{-9}$	$3,52 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-9}$	0,08927	7,931	751339,349
1,27	10	$1,05 \cdot 10^{-8}$	$4,90 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-9}$	0,08927	7,932	751350,964
1,27	12,5	$1,35 \cdot 10^{-8}$	$6,28 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-9}$	0,08927	7,932	751362,579
1,27	15	$1,65 \cdot 10^{-8}$	$7,66 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-9}$	0,08927	7,932	751374,194
1,905	7,5	$2,33 \cdot 10^{-8}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$6,77 \cdot 10^{-9}$	0,45191	6,026	253687,656
1,905	10	$3,33 \cdot 10^{-8}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$6,77 \cdot 10^{-9}$	0,45191	4,519	190267,703
1,905	12,5	$4,34 \cdot 10^{-8}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$6,77 \cdot 10^{-9}$	0,45191	3,615	152215,731
1,905	15	$5,34 \cdot 10^{-8}$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$6,77 \cdot 10^{-9}$	0,45191	3,013	126847,750
2,54	7,5	$4,99 \cdot 10^{-8}$	$2,32 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-8}$	1,42825	19,044	450996,792
2,54	10	$7,37 \cdot 10^{-8}$	$3,42 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-8}$	1,42825	14,283	338250,209
2,54	12,5	$9,74 \cdot 10^{-8}$	$4,52 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-8}$	1,42825	11,426	270602,259
2,54	15	$1,21 \cdot 10^{-7}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-8}$	1,42825	9,522	225503,625
3,175	7,5	$8,70 \cdot 10^{-8}$	$4,04 \cdot 10^{-5}$	$5,22 \cdot 10^{-8}$	3,48693	46,493	704679,219
3,175	10	$1,33 \cdot 10^{-7}$	$6,198 \cdot 10^{-5}$	$5,22 \cdot 10^{-8}$	3,48693	34,870	528512,683
3,175	12,5	$1,80 \cdot 10^{-7}$	$8,35 \cdot 10^{-5}$	$5,22 \cdot 10^{-8}$	3,48693	27,896	422812,761
3,175	15	$2,26 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$5,22 \cdot 10^{-8}$	3,48693	23,247	352346,146

#### 4.3.5 Analisis Nilai *Safety Factor* untuk Setiap Variasi *Pile*

Berdasarkan pengujian dasar dan pengujian lereng yang telah dilakukan, dengan menggunakan program PLAXIS 8.2 dapat dianalisis perubahan *Safety Factor* yang terjadi untuk setiap kondisi lereng. Adapun kondisi-kondisi lereng yang digunakan antara lain :

Kondisi 1 : Kondisi lereng tanpa beban luar dan tanpa perkuatan *pile*,

Kondisi 2 : Kondisi lereng tanpa beban luar dan dengan perkuatan *pile*,

Kondisi 3 : Kondisi lereng dengan beban luar dan tanpa perkuatan *pile*,

Kondisi 4 : Kondisi lereng dengan beban luar dan dengan perkuatan *pile*.

Dengan membandingkan tiap kondisi, maka akan dapat diketahui bagaimana pengaruh beban luar dan pengaruh perkuatan *pile* yang diberikan pada lereng untuk tiap variasi.

Kondisi yang dibandingkan antara lain :

a. Kondisi 1 dan 2

Perbandingan pada kondisi ini digunakan untuk mengetahui pengaruh tiang terhadap kekuatan lereng bila tidak dibebani dari luar.

b. Kondisi 1 dan 3

Perbandingan pada kedua kondisi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh beban luar terhadap kekuatan lereng.

c. Kondisi 2 dan 4

Perbandingan pada kondisi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan beban pada lereng yang telah diberikan perkuatan tiang.

d. Kondisi 3 dan 4

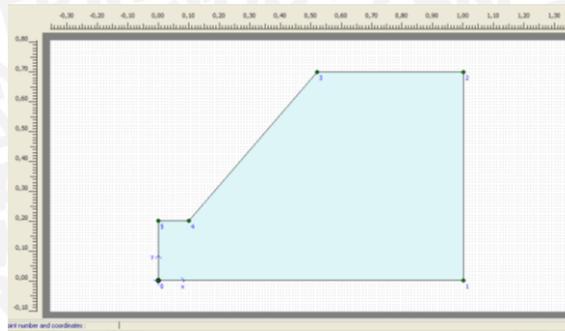
Perbandingan pada kedua kondisi ini digunakan untuk mengetahui pengaruh perkuatan tiang pada lereng yang telah diberikan penambahan beban luar.

Parameter yang digunakan dalam perhitungan *Finite Element Method* menggunakan program PLAXIS 8.2 dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Parameter tanah

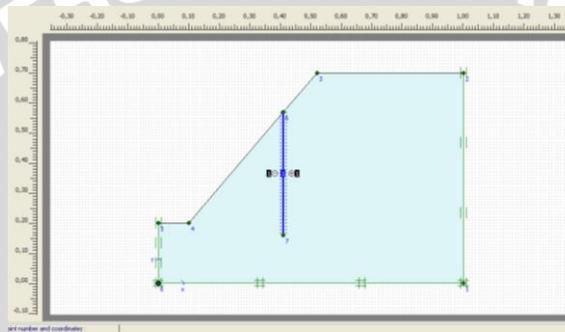
Parameter	Satuan	Nilai
Perilaku tanah	-	<i>Drained</i>
<i>Cohession</i> ( <i>c</i> )	kN/m <sup>3</sup>	0,064
Sudut geser dalam ( $\emptyset$ )	°	34,4
Berat isi kering tanah ( $\gamma_d$ )	kN/m <sup>3</sup>	13,2
Berat isi jenuh tanah ( $\gamma_s$ )	kN/m <sup>3</sup>	15

Adapun kondisi 1 pada analisis PLAXIS 8.2 dapat dilihat pada Gambar 4.27a :



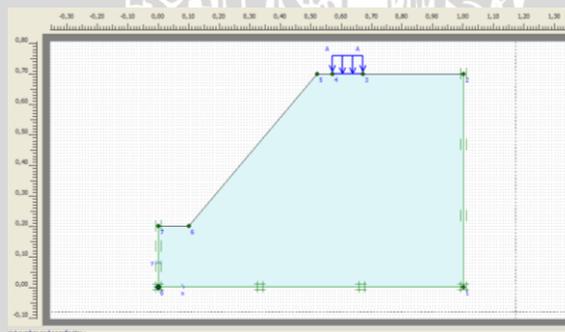
Gambar 4.27a Kondisi lereng tanpa beban luar dan tanpa perkuatan

Adapun kondisi 2 pada analisis PLAXIS 8.2 dapat dilihat pada Gambar 4.27b:



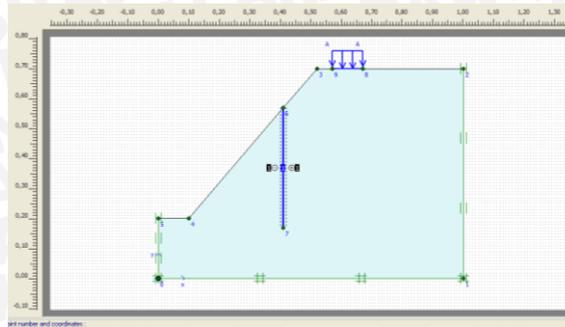
Gambar 4.27b Kondisi lereng tanpa beban luar dan dengan perkuatan

Adapun kondisi 3 pada analisis PLAXIS 8.2 dapat dilihat pada Gambar 4.27c:



Gambar 4.27c Kondisi lereng dengan beban luar dan tanpa perkuatan

Adapun kondisi 4 pada analisis PLAXIS 8.2 dapat dilihat pada Gambar 4.27d:



Gambar 4.27d Kondisi lereng dengan beban luar dan dengan perkuatan

#### 4.3.5.1 Analisis *safety factor* untuk setiap variasi diameter terhadap jarak antar *pile*

Dari analisis untuk tiap kondisi didapatkan nilai *safety factor* untuk setiap variasi diameter terhadap jarak antar perkuatan *pile* dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Nilai *safety factor* pada setiap kondisi untuk tiap variasi diameter *pile* terhadap jarak antar *pile*

D / B	D <sub>1</sub> / B	SF				Rasio Peningkatan SF
		Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4	
0,127	0,75	1,217	1,454	0,645	0,732	1,135
	1	1,217	1,453	0,645	0,731	1,133
	1,25	1,217	1,442	0,645	0,729	1,130
	1,5	1,217	1,441	0,645	0,722	1,119
0,1905	0,75	1,217	1,458	0,645	0,736	1,141
	1	1,217	1,457	0,645	0,734	1,138
	1,25	1,217	1,444	0,645	0,731	1,133
	1,5	1,217	1,443	0,645	0,725	1,124
0,254	0,75	1,217	1,463	0,645	0,741	1,149
	1	1,217	1,462	0,645	0,737	1,143
	1,25	1,217	1,446	0,645	0,733	1,136
	1,5	1,217	1,444	0,645	0,728	1,129
0,3175	0,75	1,217	1,465	0,645	0,744	1,153
	1	1,217	1,464	0,645	0,742	1,150
	1,25	1,217	1,448	0,645	0,735	1,140
	1,5	1,217	1,445	0,645	0,732	1,135

Dari analisis yang dilakukan dengan program PLAXIS 8.2, dapat dibandingkan pengaruh perkuatan dan beban sebagai berikut :

1. Perbandingan kondisi 1 dan kondisi 2 :

Dalam perhitungan kondisi 1, hanya dimasukkan berat sendiri tanah tanpa pengaruh kekuatan *pile* maupun pengaruh beban luar. Sedangkan pada kondisi 2 lereng diberikan kekuatan *pile* tanpa beban luar. Dalam analisis perbandingan kondisi ini, dapat dilihat pengaruh kekuatan *pile* dapat menambah stabilitas lereng pasir dibandingkan lereng tanpa kekuatan. Hal ini dapat dilihat dari nilai SF yang bertambah setelah lereng mendapat kekuatan *pile* dengan diameter maksimum *pile* untuk menahan beban terjadi pada diameter 3,175 cm dengan jarak antar sebesar 10 cm, karena peningkatan SF untuk jarak antar 7,5 cm dan 10 cm tidak terlalu banyak.

2. Perbandingan kondisi 1 dan 3 :

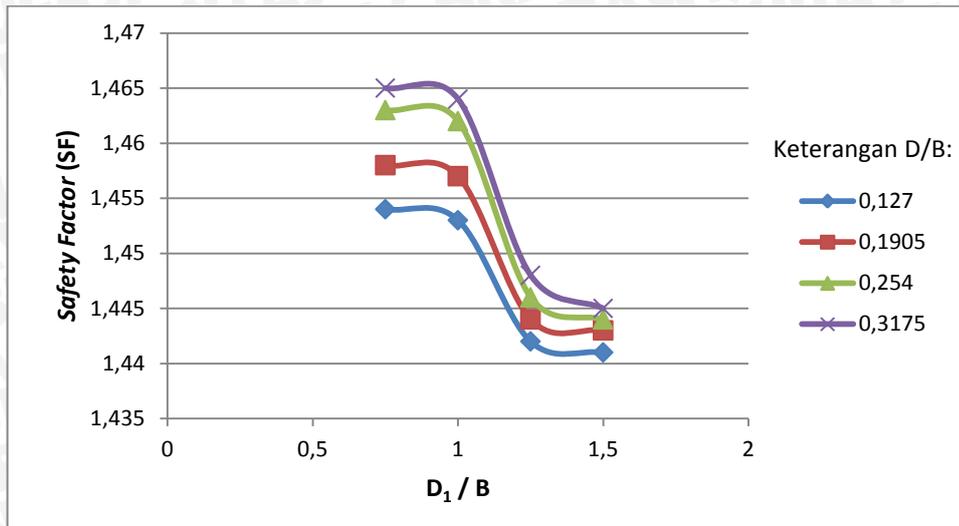
Dalam perhitungan kondisi 3, lereng diberikan penambahan beban luar sebesar 19,1 kN/m<sup>2</sup> tetapi tidak ditambahkan kekuatan pada lereng. Dari analisis dapat dilihat bahwa nilai *Safety Factor* lereng turun hampir mencapai 50 % dari nilai SF sebelum lereng ditambahkan beban luar.

3. Perbandingan kondisi 2 dan 4 :

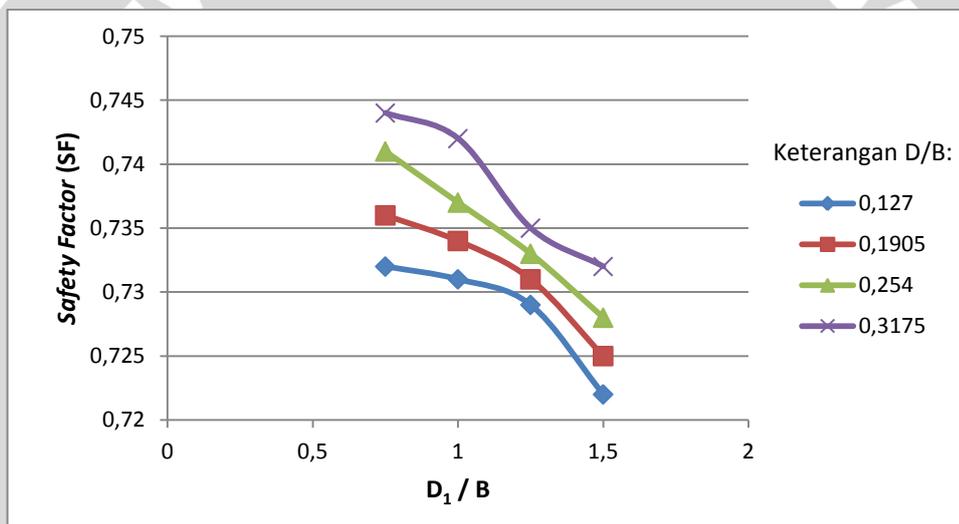
Dalam perhitungan kondisi 4, lereng mendapat pertambahan beban luar dan kekuatan *pile*. Dari analisis yang dilakukan, nilai SF turun dari nilai sebelum diberikan pertambahan beban luar. Penurunan SF yang terjadi hampir mencapai 50% dari nilai SF kondisi 2.

4. Perbandingan kondisi 3 dan 4:

Dari perbandingan 2 kondisi ini, dapat disimpulkan bahwa kekuatan berpengaruh pada stabilitas lereng meskipun terjadi penambahan beban luar yang cukup besar. Nilai SF tertinggi setelah diberikan kekuatan terjadi pada lereng yang telah diberikan kekuatan *pile* dengan diameter 3,175 cm dengan jarak antar *pile* sebesar 7,5 cm. Adapun grafik perbandingan nilai *Safety Factor* tiap variasi diameter *pile* pada tiap jarak antar *pile* dapat dijelaskan pada Gambar 4.28 dan Gambar 4.29.



Gambar 4.28 Perbandingan nilai *safety factor* tiap variasi diameter *pile* pada tiap jarak antar *pile* untuk kondisi 2



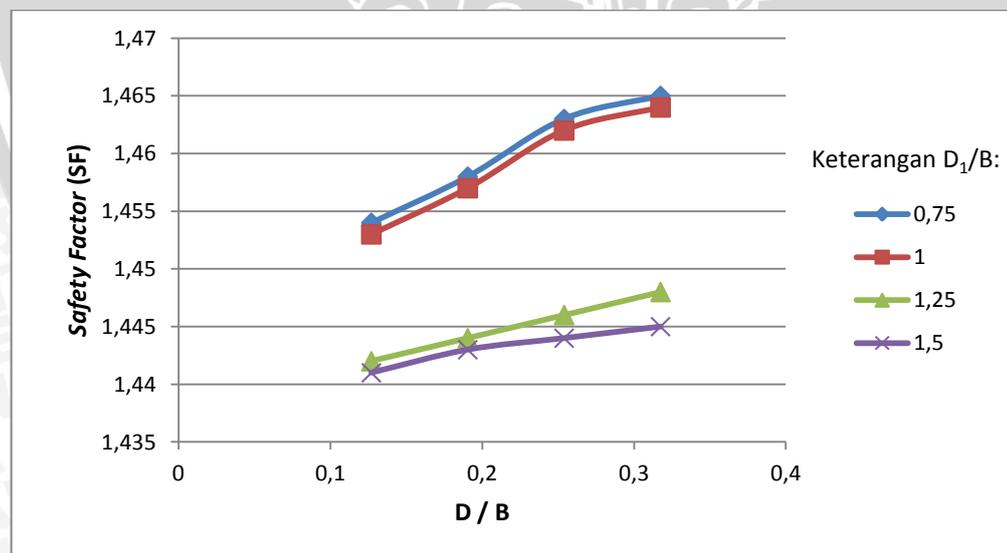
Gambar 4.29 Perbandingan nilai *safety factor* tiap variasi diameter *pile* pada tiap jarak antar *pile* untuk kondisi 4

#### 4.3.5.2 Analisis *safety factor* untuk setiap variasi jarak antar terhadap diameter *pile*

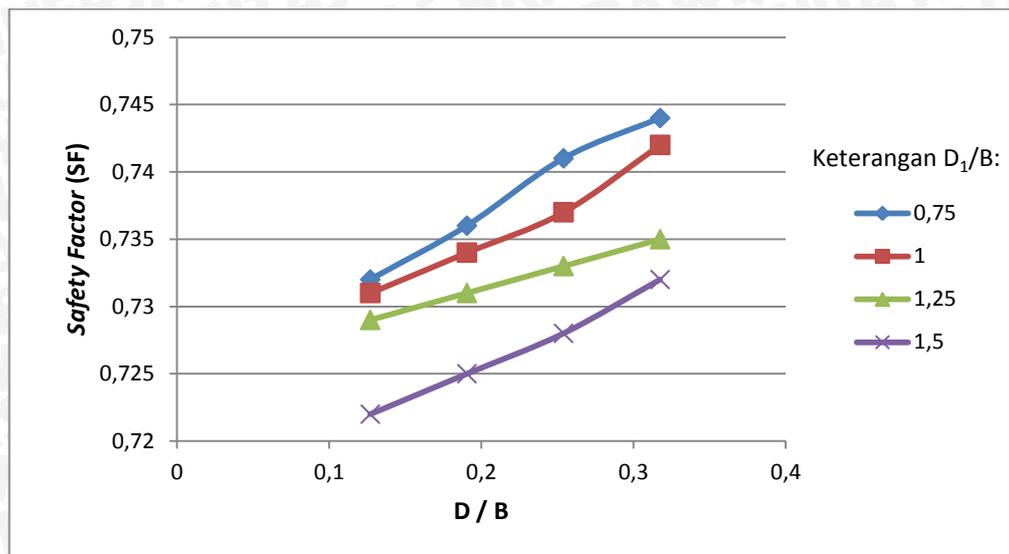
Dari analisis untuk tiap kondisi didapatkan nilai *safety factor* untuk setiap variasi jarak antar terhadap diameter perkuatan *pile* dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Nilai *safety factor* pada setiap kondisi untuk tiap variasi jarak antar *pile* terhadap diameter *pile*

$D_1 / B$	$D / B$	SF				Rasio Peningkatan SF
		Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4	
0,75	0,127	1,217	1,454	0,645	0,732	1,135
	0,1905	1,217	1,458	0,645	0,736	1,141
	0,254	1,217	1,463	0,645	0,739	1,149
	0,3175	1,217	1,465	0,645	0,744	1,153
1	0,127	1,217	1,453	0,645	0,731	1,133
	0,1905	1,217	1,457	0,645	0,734	1,138
	0,254	1,217	1,462	0,645	0,737	1,143
	0,3175	1,217	1,464	0,645	0,742	1,150
1,25	0,127	1,217	1,442	0,645	0,729	1,130
	0,1905	1,217	1,444	0,645	0,731	1,133
	0,254	1,217	1,446	0,645	0,733	1,136
	0,3175	1,217	1,448	0,645	0,735	1,140
1,5	0,127	1,217	1,441	0,645	0,722	1,119
	0,1905	1,217	1,443	0,645	0,725	1,124
	0,254	1,217	1,444	0,645	0,728	1,129
	1,5	1,217	1,445	0,645	0,732	1,135



Gambar 4.30 Perbandingan nilai *safety factor* tiap variasi jarak antar *pile* pada tiap diameter *pile* untuk kondisi 2



Gambar 4.31 Perbandingan nilai *safety factor* tiap variasi jarak antar *pile* pada tiap diameter *pile* untuk kondisi 4

Pada Gambar 4.30 didapatkan bahwa kondisi maksimum *pile* dalam menahan beban sendiri lereng adalah pada diameter 0,3175 cm dengan jarak antar *pile* 10 cm. Sedangkan pada Gambar 4.31, nilai SF tertinggi didapatkan pada diameter 3,175 cm dengan jarak antar 7,5 cm.

#### 4.4 Analisis Stabilitas *Pile* ( *Pile Stability* )

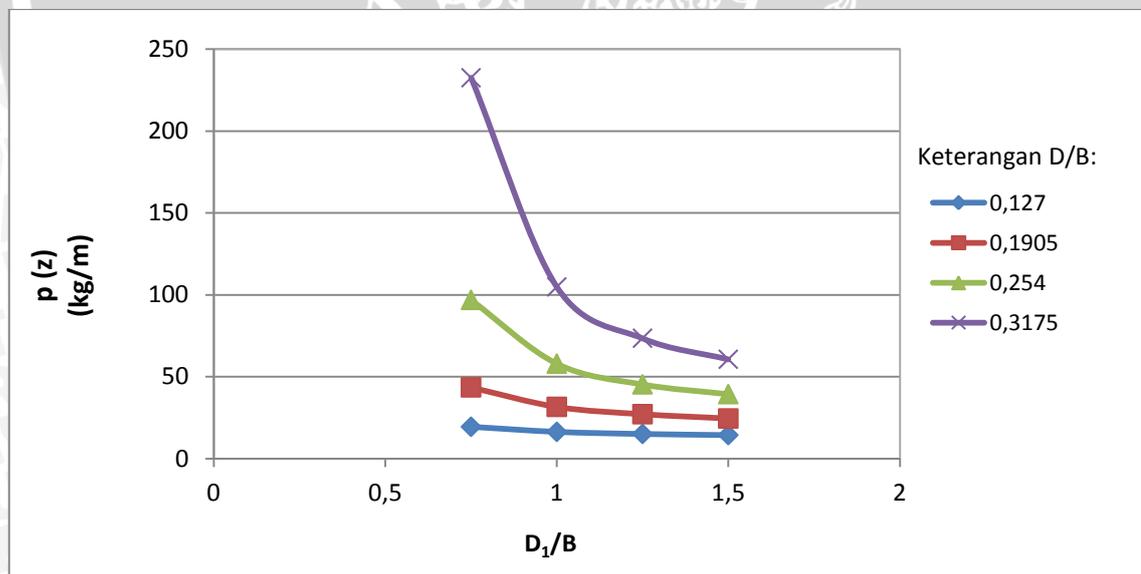
##### 4.4.1 Hubungan Antara Variasi Diameter dan Jarak Antar *Pile* terhadap Gaya Lateral $p(z)$

Ito dan Matsui (1975) adalah orang yang pertama kali mengusulkan metode untuk memprediksi tekanan tanah pada kondisi batas untuk lereng yang diperkuat dengan sebaris *pile* berdasarkan pada teori deformasi plastis. Kemudian De Beer dan Carpentier (1977) dalam Sayhan Firat (2009), mengembangkan persamaan komparasi dari Ito dan Matsui (1975). Metode tersebut memprediksi besarnya tekanan tanah pada saat tanah mencapai keseimbangan plastis berdasarkan pada kriteria leleh Mohr-Coulomb. Untuk bisa menghitung gaya lateral secara teoritis, maka kita harus mengetahui pola bidang longsor lereng yang diperkuat dengan *pile*. Pada model lereng tanah pasir yang memiliki nilai  $c = 0,064$  dan nilai  $\phi = 34,4^\circ$  dipasang sebaris *pile* dengan panjang 40 cm dengan diameter 1,27 cm, 1,905 cm, 2,54 cm, dan 3,175 cm serta dengan jarak antar *pile* sebesar 7,5 cm, 10 cm, 12,5 cm, dan 15 cm. Persamaan tekanan tanah lateral untuk tanah pasir adalah seperti di bawah ini :

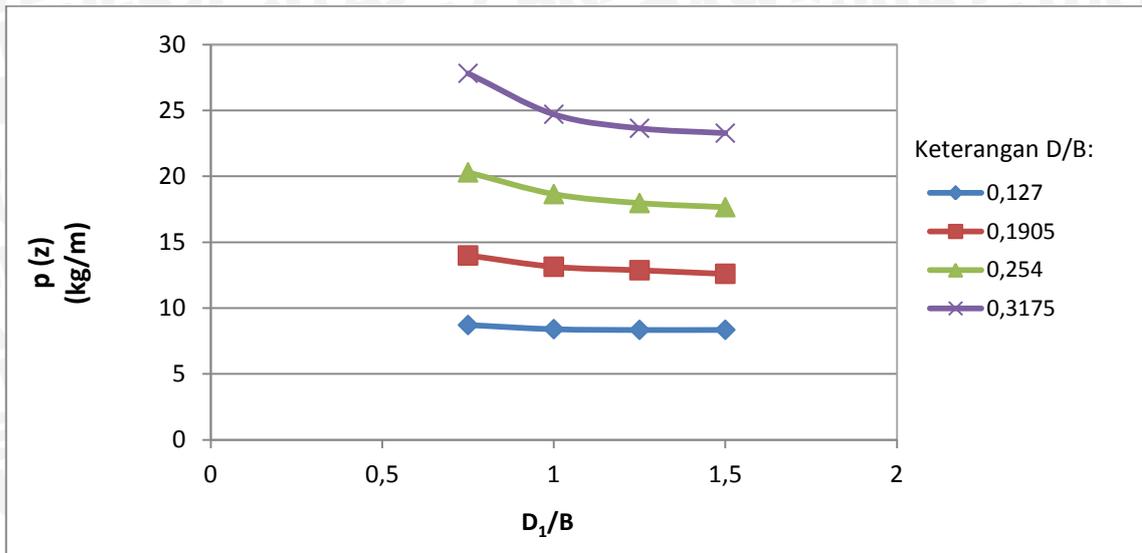


Tabel 4.15 Perbandingan gaya lateral yang diterima *p*ile dengan variasi diameter terhadap jarak antar *p*ile

D / B	D <sub>1</sub> / B	Gaya Lateral Tanah (p(z)) (kg/m)	
		Ito & Matsui	De Beer & Carpentier
0,127	0,75	19,403	8,710
	1	16,302	8,399
	1,25	15,024	8,343
	1,5	14,340	8,348
0,1905	0,75	43,459	13,989
	1	31,554	13,134
	1,25	27,082	12,871
	1,5	24,453	12,599
0,254	0,75	96,865	20,298
	1	57,945	18,652
	1,25	45,284	17,972
	1,5	39,344	17,661
0,3175	0,75	232,451	27,818
	1	104,787	24,709
	1,25	73,451	17,972
	1,5	60,606	23,278

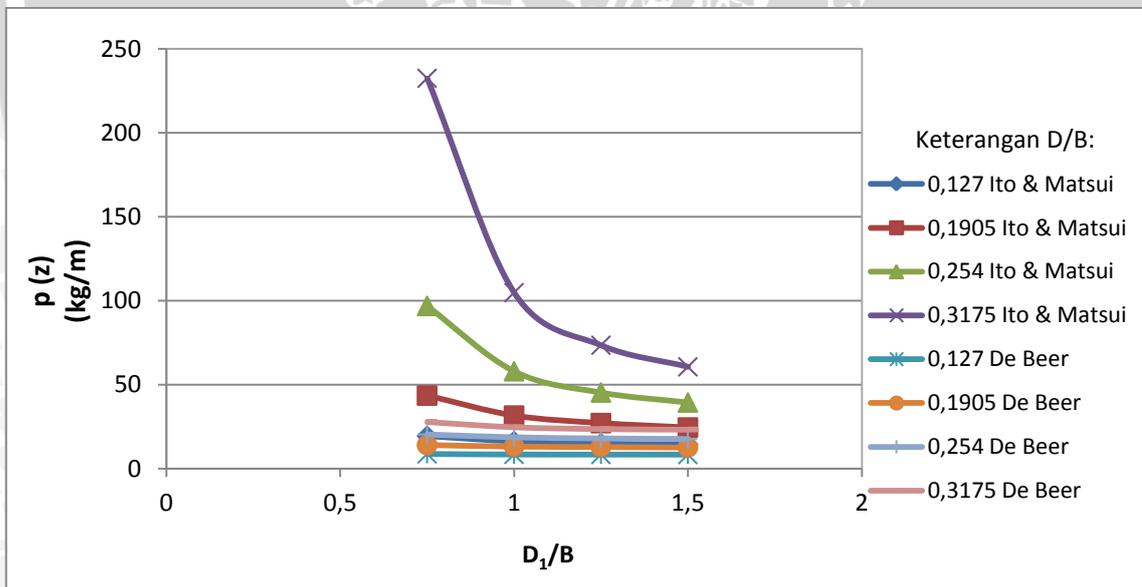


Gambar 4.32 Perbandingan nilai p(z) dengan variasi diameter terhadap jarak antar *p*ile dengan metode Ito & Matsui



Gambar 4.33 Perbandingan nilai  $p(z)$  dengan variasi diameter terhadap jarak antar *pile* dengan metode De Beer & Carpentier

Berdasarkan Gambar 4.32 dan Gambar 4.33, dapat dilihat bahwa gaya lateral terbesar terjadi pada *pile* dengan diameter 3,175 cm dan jarak antar 7,5 cm. Nilai  $p(z)$  terbesar didapatkan dari analisis menggunakan metode Ito & Matsui, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.34.



Gambar 4.34 Perbandingan nilai  $p(z)$  dengan variasi diameter terhadap jarak antar *pile* dengan metode Ito & Matsui dan De Beer & Carpentier

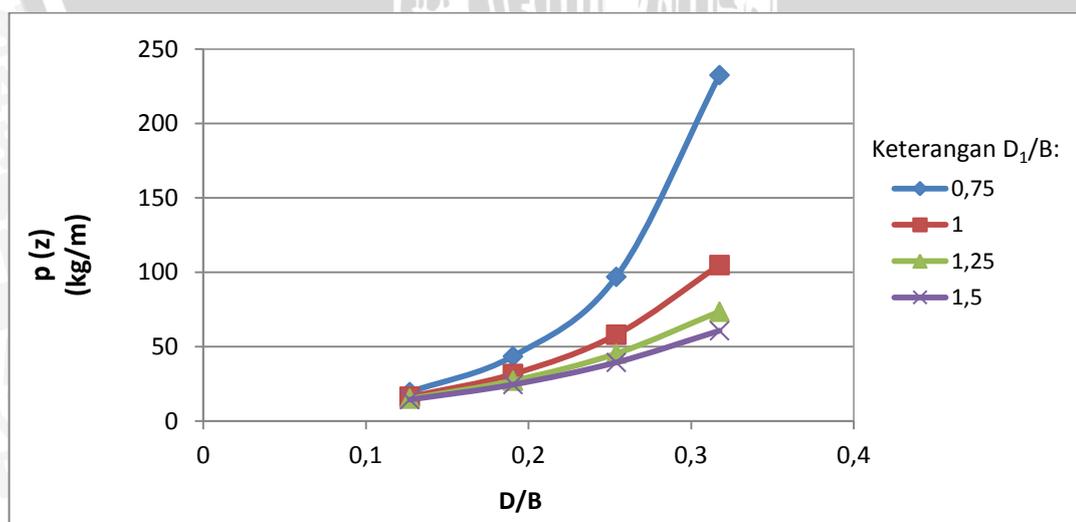
#### 4.4.1.2 Hubungan variasi jarak antar terhadap diameter *pile* dengan beban lateral

$p(z)$

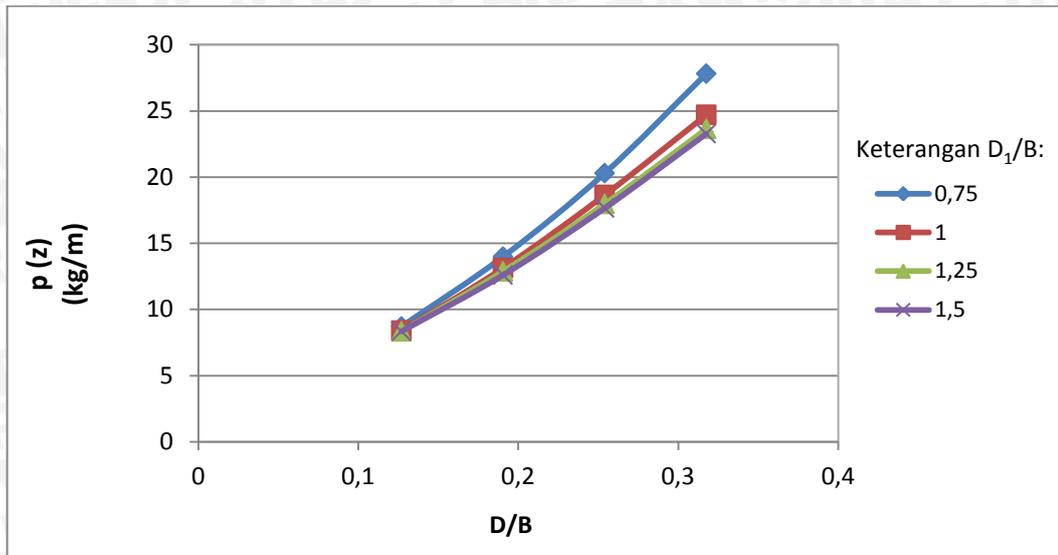
Analisis gaya lateral tanah yang dilakukan untuk *pile* dengan variasi jarak antar terhadap diameter, dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Perbandingan gaya lateral yang diterima *pile* dengan variasi jarak antar terhadap diameter *pile*

$D_1 / B$	$D / B$	Gaya Lateral Tanah ( $p(z)$ ) (kg/m)	
		Ito & Matsui	De Beer & Carpentier
0,75	0,127	19,403	8,710
	0,1905	43,459	13,989
	0,254	96,865	20,298
	0,3175	232,451	27,818
1	0,127	16,302	8,399
	0,1905	31,554	13,134
	0,254	57,945	18,652
	0,3175	104,787	24,709
1,25	0,127	15,024	8,343
	0,1905	27,082	12,871
	0,254	45,284	17,972
	0,3175	73,451	23,643
1,5	0,127	14,340	8,348
	0,1905	24,453	12,599
	0,254	39,344	17,661
	0,3175	60,606	23,278

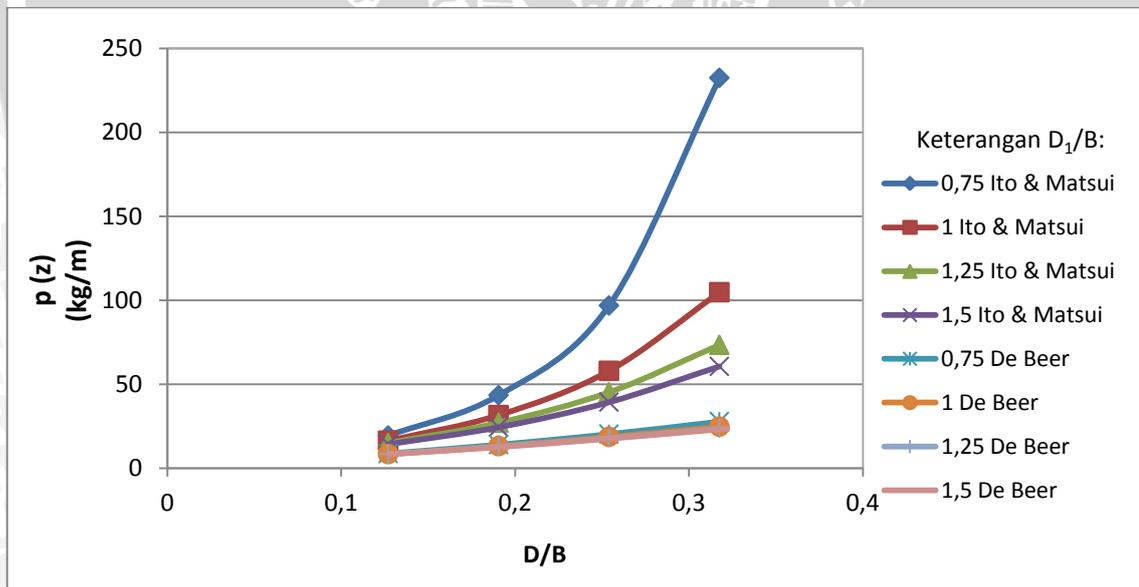


Gambar 4.35 Perbandingan nilai  $p(z)$  dengan variasi jarak antar terhadap diameter *pile* dengan metode Ito & Matsui



Gambar 4.36 Perbandingan nilai  $p(z)$  dengan variasi jarak antar terhadap diameter *pile* dengan metode De Beer & Carpentier

Berdasarkan Gambar 4.35 dan Gambar 4.36, dapat dilihat bahwa gaya lateral terbesar terjadi pada *pile* dengan jarak antar 7,5 cm dan diameter 3,175 cm. Nilai  $p(z)$  terbesar didapatkan dari analisis menggunakan metode Ito & Matsui, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.37.



Gambar 4.37 Perbandingan nilai  $p(z)$  dengan variasi jarak antara terhadap diameter *pile* dengan metode Ito & Matsui dan De Beer & Carpentier

Dari data-data di atas, dapat diketahui bahwa ukuran *pile*, dalam hal ini adalah diameter, serta jarak antar *pile* sangat berpengaruh pada gaya lateral yang terjadi. hal ini disebabkan aliran tanah yang melalui sela-sela *pile* (jarak tepi ke tepi) mempunyai nilai maksimum. Jadi apabila jarak antar *pile* semakin rapat maka *pile* tersebut dapat bekerja

secara maksimal. Sebaliknya apabila *pile* terlalu longgar, *pile* tersebut juga tidak dapat bekerja secara maksimal. Hal ini disebabkan aliran tanah yang mengalir melalui sela-sela *pile* menjadi terlalu besar. Sehingga aliran tanah yang ditahan *pile* hanya sebatas luas penampang *pile* tersebut.

Dari data perhitungan empiris dan teoritis, diperoleh nilai gaya lateral yang paling maksimum adalah pada *pile* dengan diameter 3,175 cm yang dipasang dengan jarak antar 7,5 cm. Pada ukuran dan jarak tersebut, *pile* dapat bekerja secara maksimum sehingga pola kelongsoran lereng alami dapat berubah.

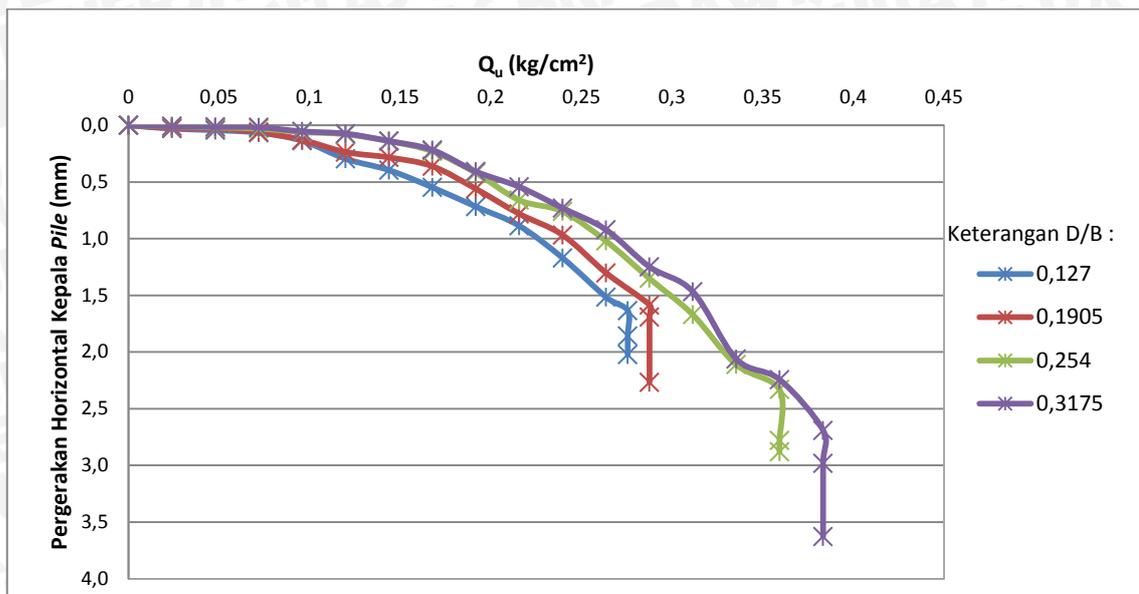
#### **4.4.2 Hubungan Antara Beban Runtuh Maksimum ( $Q_u$ ) terhadap Pergerakan Horizontal Kepala *Pile***

Pada saat dilakukan pembebanan pada lereng yang diberi perkuatan *pile*, *pile* akan menerima gaya lateral dari tanah sehingga *pile* akan mengalami pergerakan horizontal. Pergerakan horizontal yang terjadi pada kepala *pile* dapat diukur dengan menggunakan alat LVDT (*Linear Variable deformation Transformer*). Alat ini dipasang di *pile* tengah pada bagian atas *pile*. Dari hasil uji pembebanan lereng dapat diketahui bahwa ketika dilakukan penambahan beban pada lereng, akan diikuti dengan pertambahan pergerakan horizontal pada *pile* tersebut.

##### **4.4.2.1 Hubungan antara beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) dengan pergerakan horizontal kepala *pile* pada variasi diameter terhadap jarak antar *pile***

###### **a. Jarak Antar *Pile* 7,5 cm**

Dari pengujian pembebanan lereng yang telah dilakukan, didapatkan saat terjadi beban runtuh untuk *pile* dengan diameter 1,27 cm mengalami perpindahan sebesar 1,635 mm, diameter 1,905 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,586 mm, diameter 2,54 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 2,33 mm, dan diameter 3,175 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 2,692 mm. Hasil pembacaan perpindahan horizontal kepala *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.38.



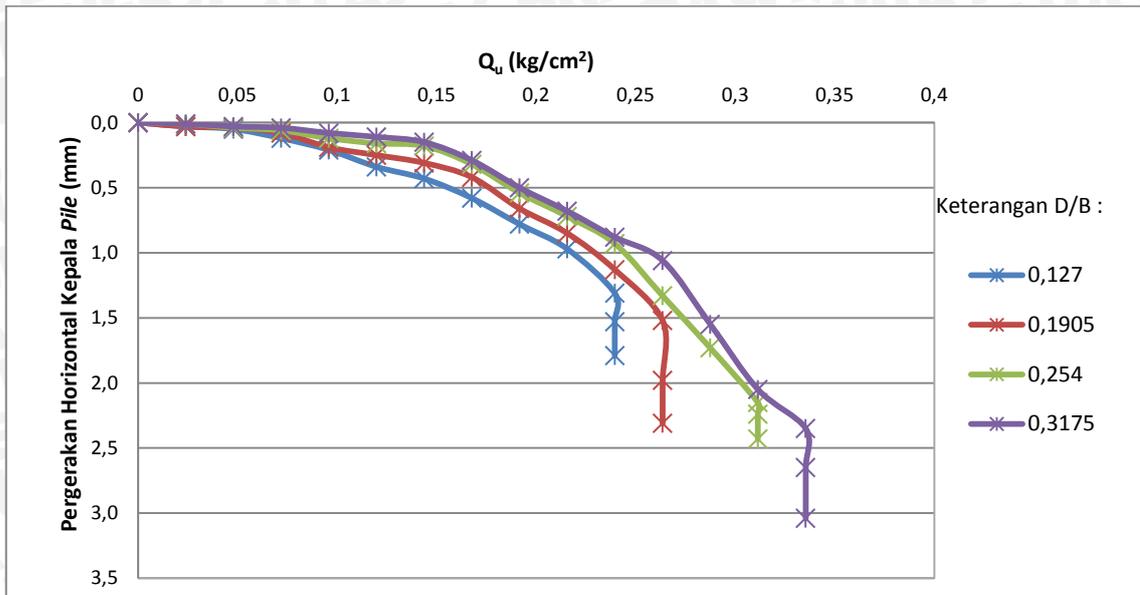
Gambar 4.38 Perbandingan nilai pergerakan horizontal kepala *pile* untuk variasi jarak antar 7,5 cm

Berdasarkan grafik di atas, diameter maksimum pada variasi jarak antar 7,5 cm adalah pada diameter 3,175 cm karena memiliki nilai perpindahan yang lebih rendah pada tiap peningkatan beban dengan beban runtuh terbesar.

#### b. Jarak Antar *Pile* 10 cm

Dari pengujian pembebanan lereng yang telah dilakukan, didapatkan saat terjadi beban runtuh untuk *pile* dengan diameter 1,27 cm mengalami perpindahan sebesar 1,31 mm, diameter 1,905 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,52 mm, diameter 2,54 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 2,15 mm, dan diameter 3,175 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 2,35 mm. Hasil pembacaan perpindahan horizontal kepala *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.39.

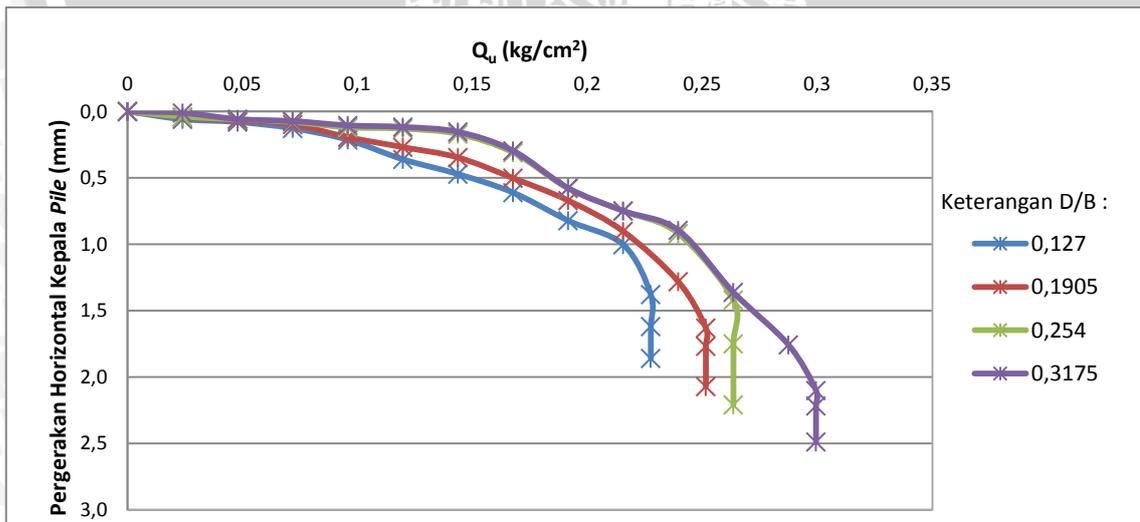
Berdasarkan grafik tersebut, diameter maksimum pada variasi jarak antar 10 cm adalah pada diameter 3,175 cm karena memiliki nilai perpindahan yang lebih rendah pada tiap peningkatan beban dengan beban runtuh terbesar.



Gambar 4.39 Perbandingan nilai pergerakan horizontal kepala pile untuk variasi jarak antar 10 cm

**c. Jarak Antar Pile 12,5 cm**

Dari pengujian pembebanan lereng yang telah dilakukan, didapatkan saat terjadi beban runtuh untuk pile dengan diameter 1,27 cm mengalami perpindahan sebesar 1,379 mm, diameter 1,905 cm pergerakan horizontal kepala pile sebesar 1,631 mm, diameter 2,54 cm pergerakan horizontal kepala pile sebesar 1,42 mm, dan diameter 3,175 cm pergerakan horizontal kepala pile sebesar 2,102 mm. Hasil pembacaan perpindahan horizontal kepala pile dapat dilihat pada Gambar 4.40.

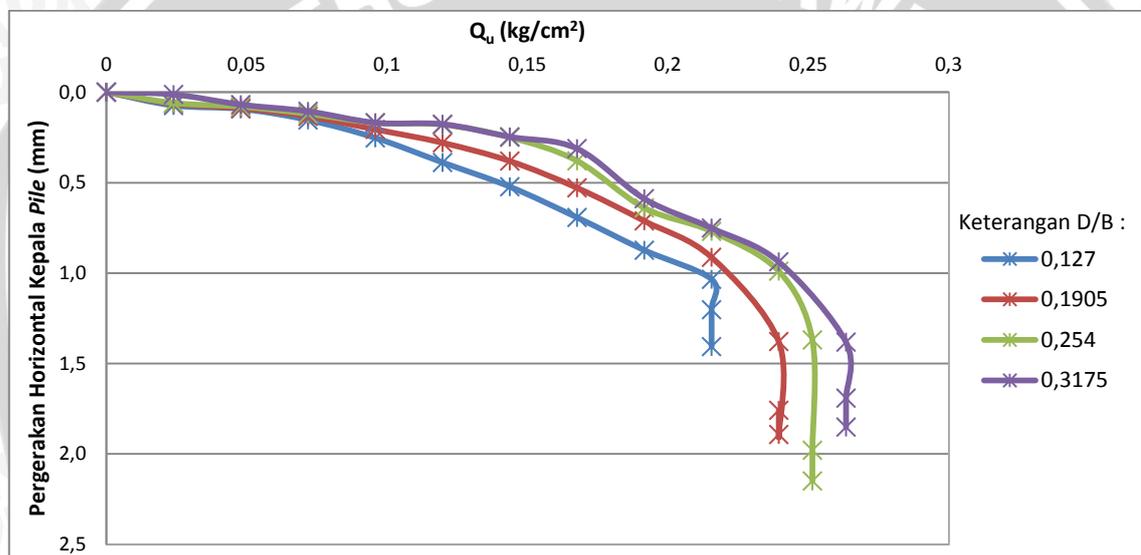


Gambar 4.40 Perbandingan nilai pergerakan horizontal kepala pile untuk variasi jarak antar 12,5 cm

Berdasarkan grafik di atas, diameter maksimum pada variasi jarak antar 12,5 cm adalah pada diameter 3,175 cm karena memiliki nilai perpindahan yang lebih rendah pada tiap peningkatan beban dengan beban runtuh terbesar.

#### d. Jarak Antar *Pile* 15 cm

Dari pengujian pembebanan lereng yang telah dilakukan, didapatkan saat terjadi beban runtuh untuk *pile* dengan diameter 1,27 cm mengalami perpindahan sebesar 1,035 mm, diameter 1,905 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,379 mm, diameter 2,54 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,37 mm, dan diameter 3,175 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,382 mm. Hasil pembacaan perpindahan horizontal kepala *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.41.



Gambar 4.41 Perbandingan nilai pergerakan horizontal kepala *pile* untuk variasi jarak antar 15 cm

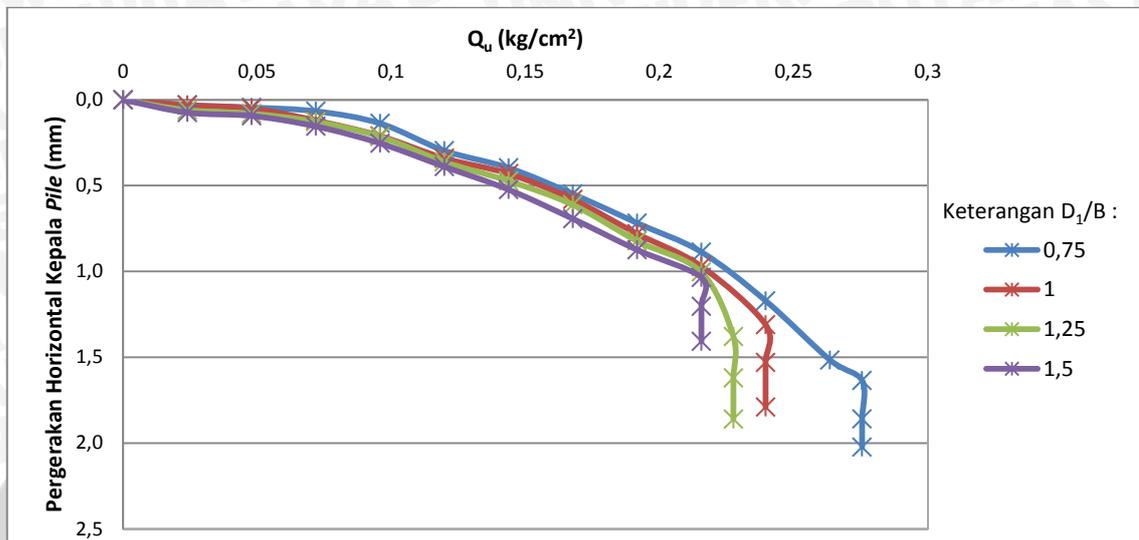
Berdasarkan grafik di atas, diameter maksimum pada variasi jarak antar 12,5 cm adalah pada diameter 3,175 cm karena memiliki nilai perpindahan yang lebih rendah pada tiap peningkatan beban dengan beban runtuh terbesar.

#### 4.4.2.2 Hubungan antara beban runtuh maksimum ( $Q_u$ ) dengan pergerakan horizontal kepala *pile* pada variasi jarak antar terhadap diameter *pile*

##### a. Diameter *Pile* 1,27 cm

Dari pengujian pembebanan lereng yang telah dilakukan, didapatkan saat terjadi beban runtuh untuk *pile* dengan jarak antar 7,5 cm mengalami perpindahan sebesar 1,635 mm, jarak antar 10 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar

1,31 mm, jarak antar 12,5 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,379 mm, dan jarak antar 15 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,035 mm. Hasil pembacaan perpindahan horizontal kepala *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.42.

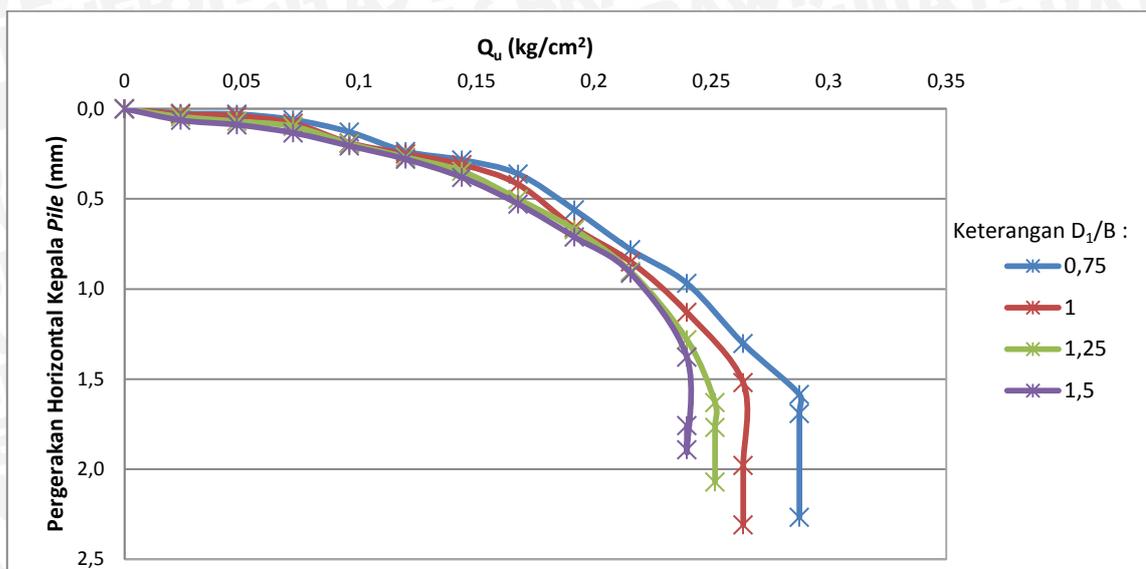


Gambar 4.42 Perbandingan nilai pergerakan horizontal kepala *pile* untuk variasi diameter 1,27 cm

Berdasarkan grafik di atas, diameter maksimum pada variasi diameter 1,27 cm adalah pada jarak antar 7,5 cm karena memiliki nilai perpindahan yang lebih rendah pada tiap peningkatan beban dengan beban runtuh terbesar.

#### b. Diameter *Pile* 1,905 cm

Dari pengujian pembebanan lereng yang telah dilakukan, didapatkan saat terjadi beban runtuh untuk *pile* dengan jarak antar 7,5 cm mengalami perpindahan sebesar 1,586 mm, jarak antar 10 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,52 mm, jarak antar 12,5 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,631 mm, dan jarak antar 15 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,379 mm. Hasil pembacaan perpindahan horizontal kepala *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.43.



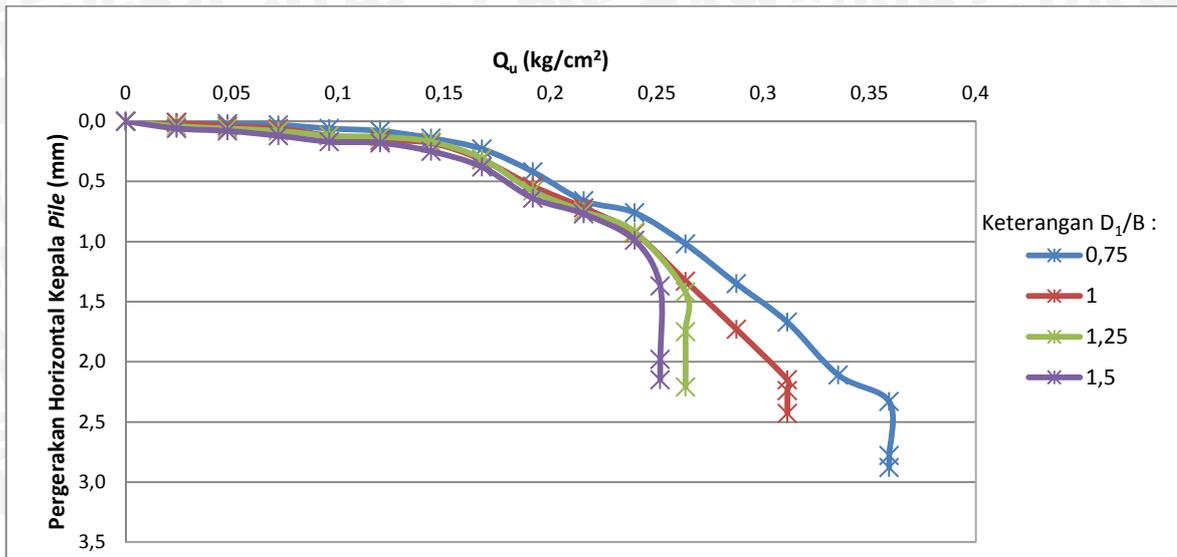
Gambar 4.43 Perbandingan nilai pergerakan horizontal kepala *pile* untuk variasi diameter 1,905 cm

Berdasarkan grafik di atas, diameter maksimum pada variasi diameter 1,905 cm adalah pada jarak antar 7,5 cm karena memiliki nilai perpindahan yang lebih rendah pada tiap peningkatan beban dengan beban runtuh terbesar.

### c. Diameter *Pile* 2,54 cm

Dari pengujian pembebanan lereng yang telah dilakukan, didapatkan saat terjadi beban runtuh untuk *pile* dengan jarak antar 7,5 cm mengalami perpindahan sebesar 2,33 mm, jarak antar 10 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 2,15 mm, jarak antar 12,5 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,42 mm, dan jarak antar 15 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,37 mm. Hasil pembacaan perpindahan horizontal kepala *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.44.

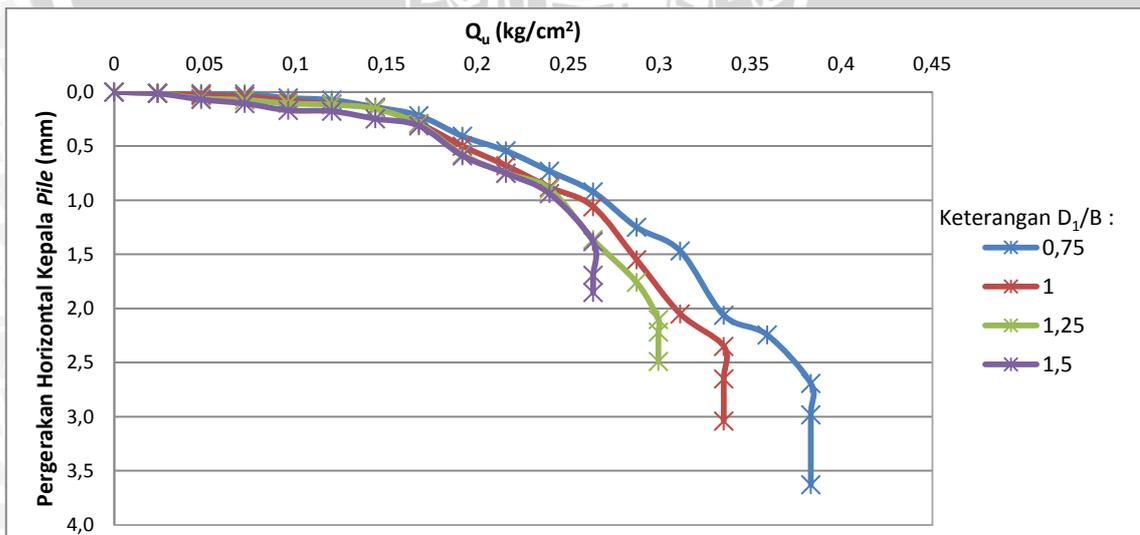
Berdasarkan grafik tersebut, diameter maksimum pada variasi diameter 2,54 cm adalah pada jarak antar 7,5 cm karena memiliki nilai perpindahan yang lebih rendah pada tiap peningkatan beban dengan beban runtuh terbesar.



Gambar 4.44 Perbandingan nilai pergerakan horizontal kepala *pile* untuk variasi diameter 2,54 cm

**d. Diameter Pile 3,175 cm**

Dari pengujian pembebanan lereng yang telah dilakukan, didapatkan saat terjadi beban runtuh untuk *pile* dengan jarak antar 7,5 cm mengalami perpindahan sebesar 2,692 mm, jarak antar 10 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 2,35 mm, jarak antar 12,5 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 2,102 mm, dan jarak antar 15 cm pergerakan horizontal kepala *pile* sebesar 1,382 mm. Hasil pembacaan perpindahan horizontal kepala *pile* dapat dilihat pada Gambar 4.45.



Gambar 4.45 Perbandingan nilai pergerakan horizontal kepala *pile* untuk variasi diameter 3,175 cm



Berdasarkan grafik di atas, diameter maksimum pada variasi diameter 3,175 cm adalah pada jarak antar 7,5 cm karena memiliki nilai perpindahan yang lebih rendah pada tiap peningkatan beban dengan beban runtuh terbesar.

#### 4.4.3 Analisis *Bending Moment* pada *Pile* berdasarkan Kalibrasi Nilai Regangan dengan Metode *Four Point Bending Test*

Reaksi yang terjadi pada *pile* dapat dilihat melalui analisis *bending moment* yang didapatkan melalui pembacaan *strain meter* selama penelitian. Berdasarkan analisis *bending moment*, semakin besar beban maka regangan pada *pile* juga semakin bertambah sehingga *bending moment* ikut bertambah seiring penambahan beban. Untuk menghitung nilai *bending moment* pada *pile* diperoleh dengan cara memasukkan nilai regangan dalam persamaan kalibrasi yang diperoleh dari grafik kalibrasi *strain gauge*. Untuk bagian ujung atas dan bawah *pile*, momen = 0 karena tidak dilakukan pembacaan pada bagian tersebut.

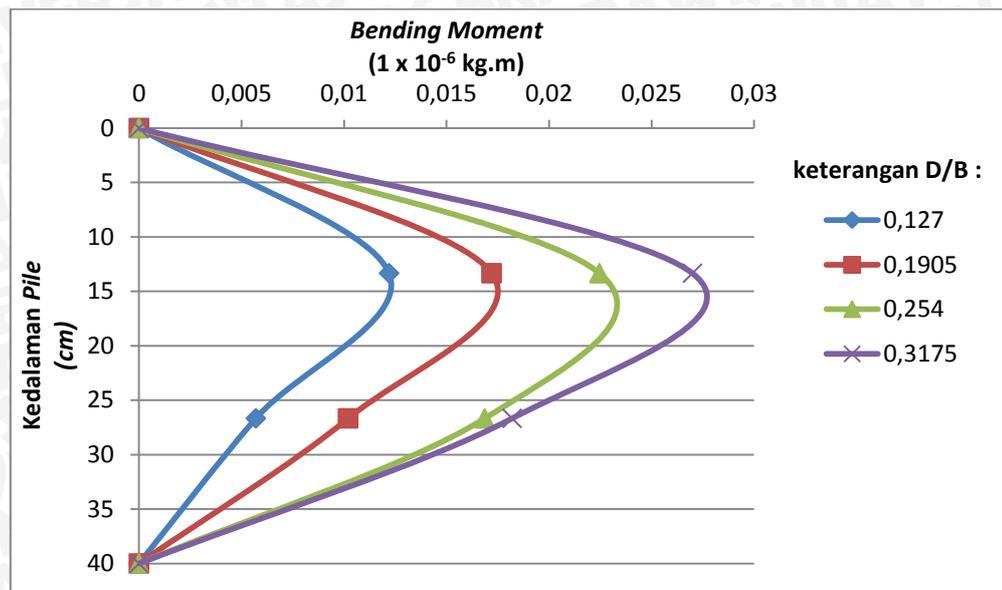
##### 4.4.3.1 Perbandingan *bending moment* pada *pile* untuk variasi diameter terhadap jarak antar *pile*

###### a. Jarak Antar *Pile* 7,5 cm

Berdasarkan grafik kalibrasi nilai *strain gauge*, maka nilai *bending moment* untuk tiap pembacaan dapat ditentukan dengan memasukkan nilai regangan dalam persamaan kalibrasi. Nilai regangan yang dimasukkan merupakan nilai regangan saat beban mengalami keruntuhan. Adapun perhitungan nilai *bending moment* dapat dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Perhitungan *bending moment* pada variasi *pile* jarak antar 7,5 cm untuk tiap variasi diameter

Kedalaman (H) ( m )	Momen ( $1 \times 10^{-6}$ kg.m )			
	1,27 cm	1,905 cm	2,54 cm	3,175 cm
0	0	0	0	0
0,13	0,0122	0,0172	0,0225	0,0270
0,27	0,0057	0,0102	0,0169	0,0182
0,40	0	0	0	0



Gambar 4.46 *Bending moment* pada variasi jarak antar pile 7,5 cm

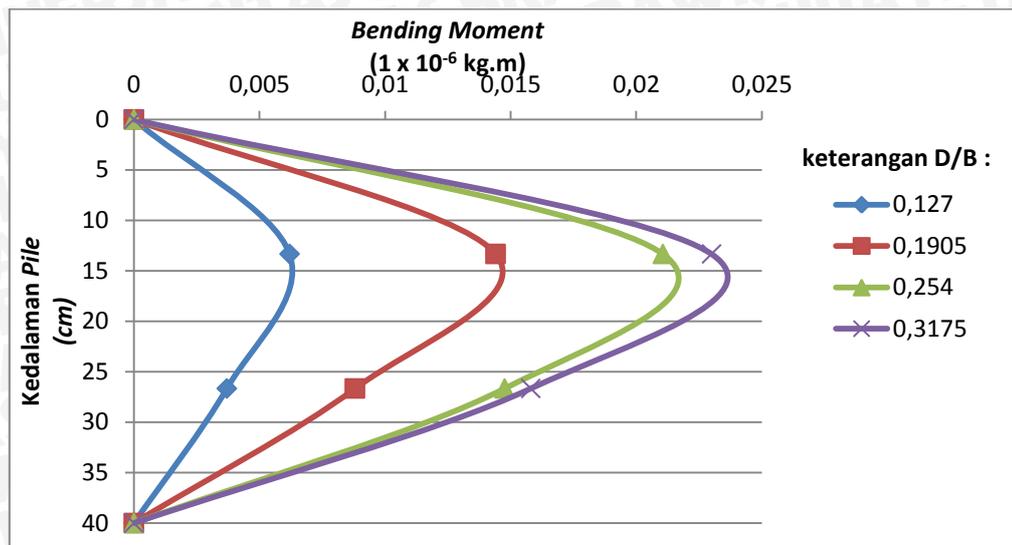
Dari Gambar 4.46, dapat diketahui bahwa *pile* dengan diameter 3,175 cm merupakan diameter maksimum karena *pile* ini memiliki *bending moment* terbesar dari variasi lainnya. Dengan kata lain, *pile* diameter 3,175 cm memiliki kemampuan menahan *bending moment* yang lebih baik dari variasi lainnya.

#### b. Jarak Antar Pile 10 cm

Berdasarkan grafik kalibrasi nilai *strain gauge*, maka nilai *bending moment* untuk tiap pembacaan dapat ditentukan dengan memasukkan nilai regangan dalam persamaan kalibrasi. Nilai regangan yang dimasukkan merupakan nilai regangan saat beban mengalami keruntuhan. Adapun perhitungan nilai *bending moment* dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Perhitungan *bending moment* pada variasi *pile* jarak antar 10 cm untuk tiap variasi diameter

Kedalaman (H) ( m )	Momen ( $1 \times 10^{-6}$ kg.m )			
	1,27 cm	1,905 cm	2,54 cm	3,175 cm
0	0	0	0	0
0,13	0,0062	0,0144	0,0211	0,0230
0,27	0,0037	0,0088	0,0148	0,0158
0,40	0	0	0	0



Gambar 4.47 *Bending moment* pada variasi jarak antar *pile* 10 cm

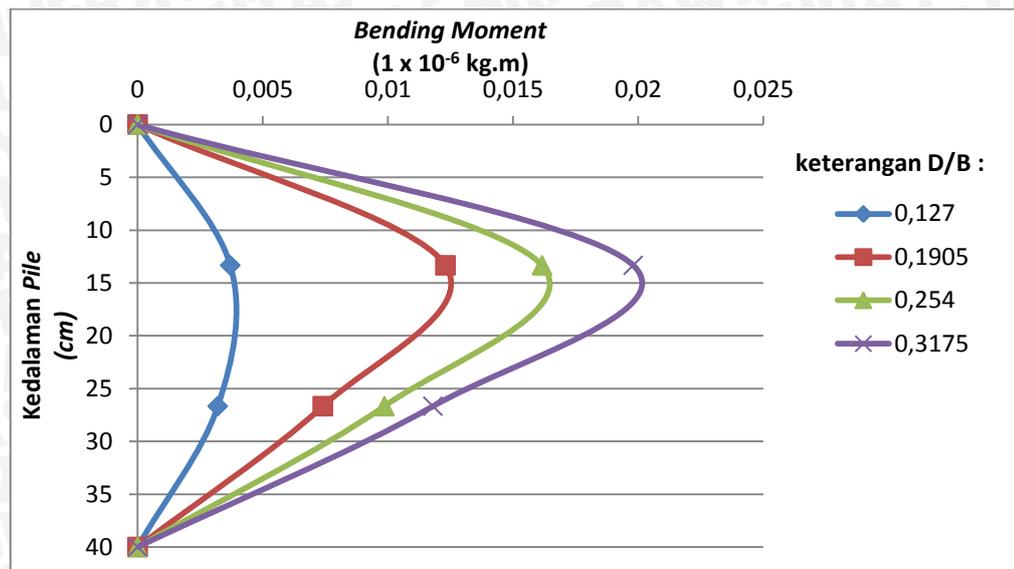
Dari Gambar 4.47, dapat diketahui bahwa *pile* dengan diameter 3,175 cm merupakan diameter maksimum karena *pile* ini memiliki *bending moment* terbesar dari variasi lainnya. Dengan kata lain, *pile* diameter 3,175 cm memiliki kemampuan menahan *bending moment* yang lebih baik dari variasi lainnya.

### c. Jarak Antar *Pile* 12,5 cm

Berdasarkan grafik kalibrasi nilai *strain gauge*, maka nilai *bending moment* untuk tiap pembacaan dapat ditentukan dengan memasukkan nilai regangan dalam persamaan kalibrasi. Nilai regangan yang dimasukkan merupakan nilai regangan saat beban mengalami keruntuhan. Adapun perhitungan nilai *bending moment* dapat dilihat pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Perhitungan *bending moment* pada variasi *pile* jarak antar 12,5 cm untuk tiap variasi diameter

Kedalaman (H) ( m )	Momen ( $1 \times 10^{-6}$ kg.m )			
	1,27 cm	1,905 cm	2,54 cm	3,175 cm
0	0	0	0	0
0,13	0,0037	0,0123	0,0162	0,0198
0,27	0,0032	0,0074	0,0099	0,0118
0,40	0	0	0	0



Gambar 4.48 *Bending moment* pada variasi jarak antar pile 12,5 cm

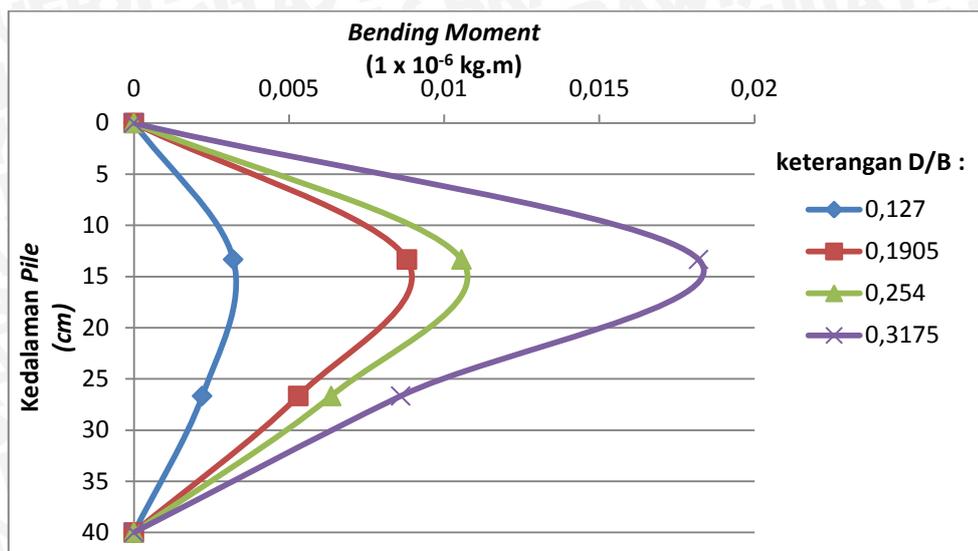
Dari Gambar 4.48, dapat diketahui bahwa pile dengan diameter 3,175 cm merupakan diameter maksimum karena pile ini memiliki *bending moment* terbesar dari variasi lainnya. Dengan kata lain, pile diameter 3,175 cm memiliki kemampuan menahan *bending moment* yang lebih baik dari variasi lainnya.

#### d. Jarak Antar Pile 15 cm

Berdasarkan grafik kalibrasi nilai *strain gauge*, maka nilai *bending moment* untuk tiap pembacaan dapat ditentukan dengan memasukkan nilai regangan dalam persamaan kalibrasi. Nilai regangan yang dimasukkan merupakan nilai regangan saat beban mengalami keruntuhan. Adapun perhitungan nilai *bending moment* dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Perhitungan *bending moment* pada variasi pile jarak antar 15 cm untuk tiap variasi diameter

Kedalaman (H) ( m )	Momen ( $1 \times 10^{-6}$ kg.m )			
	1,27 cm	1,905 cm	2,54 cm	3,175 cm
0	0	0	0	0
0,13	0,0032	0,0088	0,0106	0,0182
0,27	0,0022	0,0053	0,0064	0,0086
0,40	0	0	0	0



Gambar 4.49 *Bending moment* pada variasi jarak antar *pile* 15 cm

Dari Gambar 4.49, dapat diketahui bahwa *pile* dengan diameter 3,175 cm merupakan diameter maksimum karena *pile* ini memiliki *bending moment* terbesar dari variasi lainnya. Dengan kata lain, *pile* diameter 3,175 cm memiliki kemampuan menahan *bending moment* yang lebih baik dari variasi lainnya.

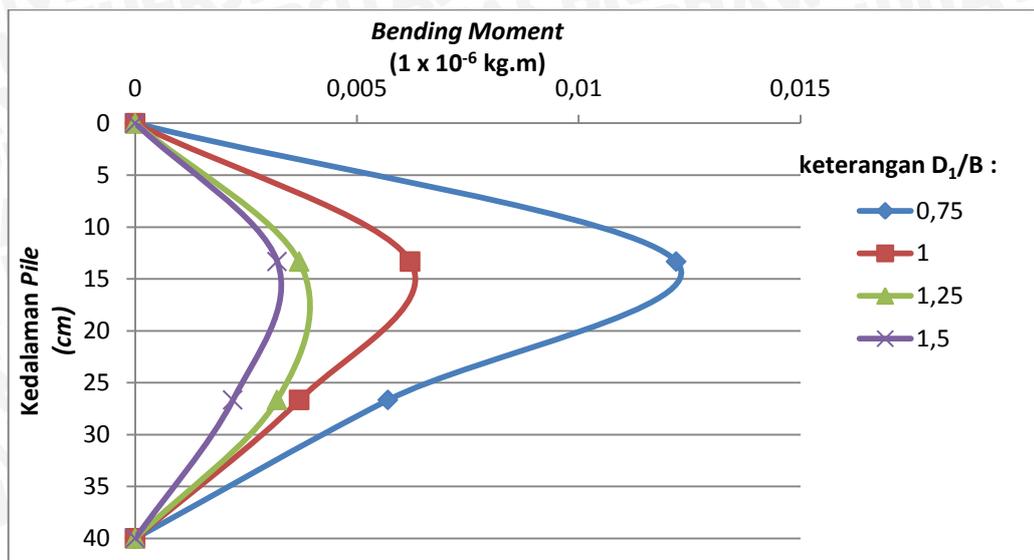
#### 4.4.3.2 Perbandingan *bending moment* pada *pile* untuk variasi jarak antar terhadap diameter *pile*

##### a. Diameter *Pile* 1,27 cm

Berdasarkan grafik kalibrasi nilai *strain gauge*, maka nilai *bending moment* untuk tiap pembacaan dapat ditentukan dengan memasukkan nilai regangan dalam persamaan kalibrasi. Nilai regangan yang dimasukkan merupakan nilai regangan saat beban mengalami keruntuhan. Adapun perhitungan nilai *bending moment* dapat dilihat pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Perhitungan *bending moment* pada variasi *pile* diameter 1,27 cm untuk tiap variasi jarak antar

Kedalaman (H) ( m )	Momen ( $1 \times 10^{-6}$ kg.m )			
	7,5 cm	10 cm	12,5 cm	15 cm
0	0	0	0	0
0,13	0,0122	0,0062	0,0037	0,0032
0,27	0,0057	0,0037	0,0032	0,0022
0,40	0	0	0	0



Gambar 4.50 *Bending moment* pada variasi diameter pile 1,27 cm

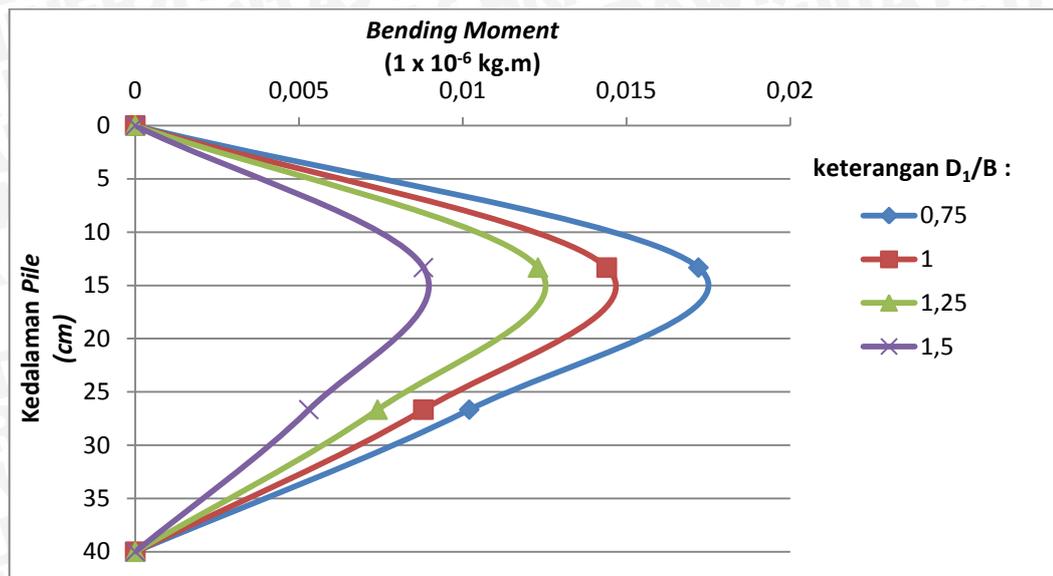
Dari Gambar 4.50, dapat diketahui bahwa *pile* yang dipasang dengan jarak antar 7,5 cm merupakan jarak antar *pile* yang maksimum karena *pile* ini memiliki *bending moment* terbesar dari variasi lainnya. Dengan kata lain, jarak antar *pile* 7,5 cm memiliki kemampuan menahan *bending moment* yang lebih baik dari variasi lainnya.

#### b. Diameter Pile 1,905 cm

Berdasarkan grafik kalibrasi nilai *strain gauge*, maka nilai *bending moment* untuk tiap pembacaan dapat ditentukan dengan memasukkan nilai regangan dalam persamaan kalibrasi. Nilai regangan yang dimasukkan merupakan nilai regangan saat beban mengalami keruntuhan. Adapun perhitungan nilai *bending moment* dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Perhitungan *bending moment* pada variasi *pile* diameter 1,905 cm untuk tiap variasi jarak antar

Kedalaman (H) ( m )	Momen ( $1 \times 10^{-6}$ kg.m )			
	7,5 cm	10 cm	12,5 cm	15 cm
0	0	0	0	0
0,13	0,0172	0,0144	0,0123	0,0088
0,27	0,0102	0,0088	0,0074	0,0053
0,40	0	0	0	0



Gambar 4.51 *Bending moment* pada variasi diameter pile 1,905 cm

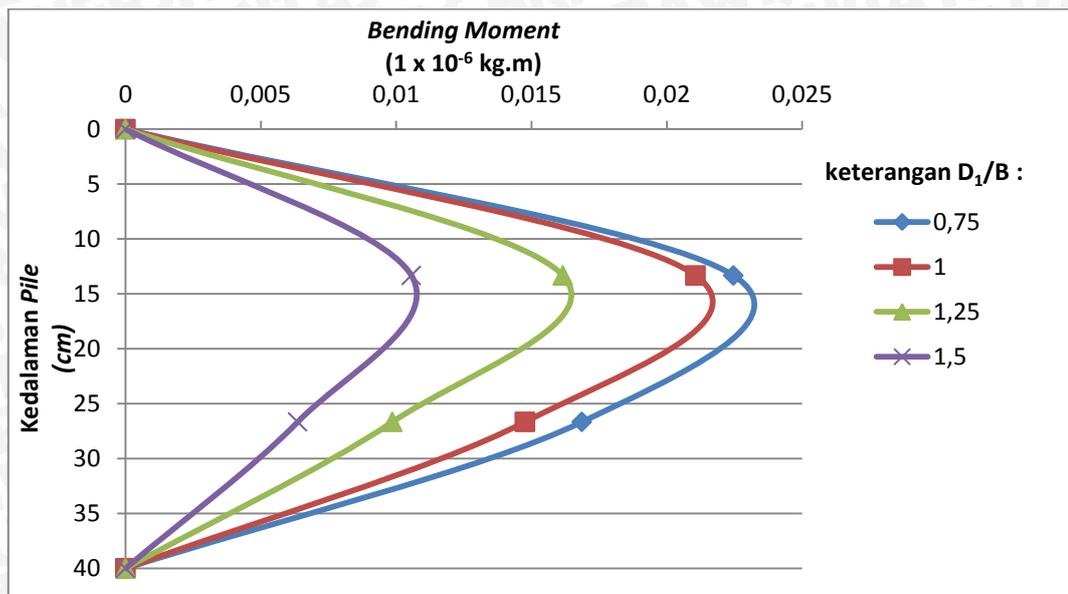
Dari Gambar 4.51, dapat diketahui bahwa *pile* yang dipasang dengan jarak antar 7,5 cm merupakan jarak antar *pile* yang maksimum karena *pile* ini memiliki *bending moment* terbesar dari variasi lainnya. Dengan kata lain, jarak antar *pile* 7,5 cm memiliki kemampuan menahan *bending moment* yang lebih baik dari variasi lainnya.

### c. Diameter Pile 2,54 cm

Berdasarkan grafik kalibrasi nilai *strain gauge*, maka nilai *bending moment* untuk tiap pembacaan dapat ditentukan dengan memasukkan nilai regangan dalam persamaan kalibrasi. Nilai regangan yang dimasukkan merupakan nilai regangan saat beban mengalami keruntuhan. Adapun perhitungan nilai *bending moment* dapat dilihat pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Perhitungan *bending moment* pada variasi *pile* diameter 2,54 cm untuk tiap variasi jarak antar

Kedalaman (H) ( m )	Momen ( $1 \times 10^{-6} \text{ kg.m}$ )			
	7,5 cm	10 cm	12,5 cm	15 cm
0	0	0	0	0
0,13	0,0225	0,0211	0,0162	0,0106
0,27	0,0169	0,0148	0,0099	0,0064
0,40	0	0	0	0



Gambar 4.52 *Bending moment* pada variasi diameter *pile* 2,54 cm

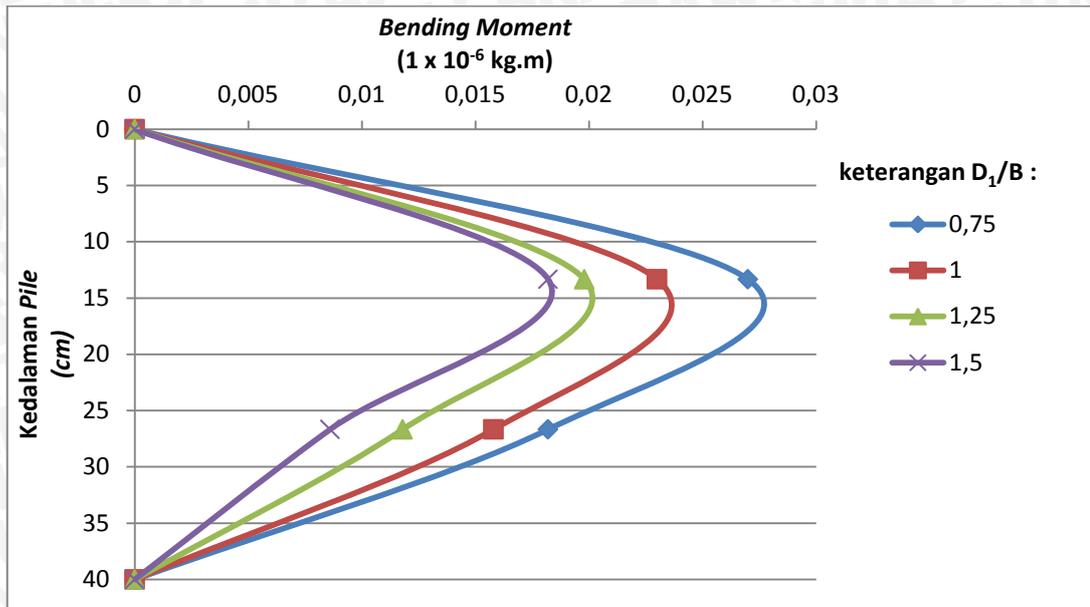
Dari Gambar 4.52, dapat diketahui bahwa *pile* yang dipasang dengan jarak antar 7,5 cm merupakan jarak antar *pile* yang maksimum karena *pile* ini memiliki *bending moment* terbesar dari variasi lainnya. Dengan kata lain, jarak antar *pile* 7,5 cm memiliki kemampuan menahan *bending moment* yang lebih baik dari variasi lainnya.

#### d. Diameter *Pile* 3,175 cm

Berdasarkan grafik kalibrasi nilai *strain gauge*, maka nilai *bending moment* untuk tiap pembacaan dapat ditentukan dengan memasukkan nilai regangan dalam persamaan kalibrasi. Nilai regangan yang dimasukkan merupakan nilai regangan saat beban mengalami keruntuhan. Adapun perhitungan nilai *bending moment* dapat dilihat pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Perhitungan *bending moment* pada variasi *pile* diameter 3,175 cm untuk tiap variasi jarak antar

Kedalaman (H) (m)	Momen ( $1 \times 10^{-6}$ kg.m)			
	7,5 cm	10 cm	12,5 cm	15 cm
0	0	0	0	0
0,13	0,0270	0,0230	0,0198	0,0182
0,27	0,0182	0,0158	0,0118	0,0086
0,40	0	0	0	0



Gambar 4.53 *Bending moment* pada variasi diameter pile 3,175 cm

Dari Gambar 4.53, dapat diketahui bahwa *pile* yang dipasang dengan jarak antar 7,5 cm merupakan jarak antar *pile* yang maksimum karena *pile* ini memiliki *bending moment* terbesar dari variasi lainnya. Dengan kata lain, jarak antar *pile* 7,5 cm memiliki kemampuan menahan *bending moment* yang lebih baik dari variasi lainnya.